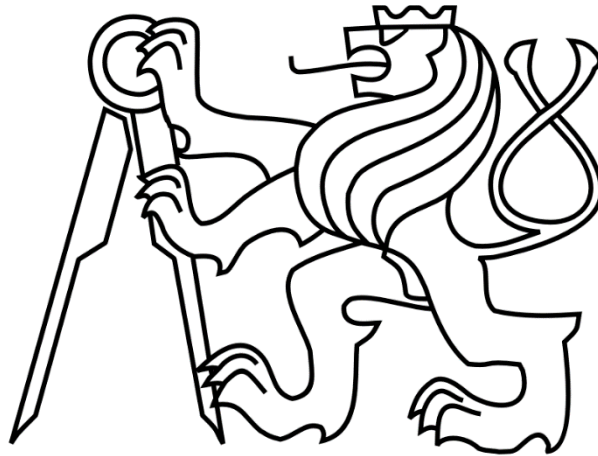


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Analýza přesnosti otočného stolu MCU 700

2019

Bc. Jiří Štecher

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štecher** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **437266**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní stroje a zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Analýza přesnosti otočného stolu MCU 700

Název diplomové práce anglicky:

The accuracy analysis of the tilting rotary table of MCU 700

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je návrh metodiky měření přesnosti otočné - sklopného stolu pětiosého frézovacího centra. Popis tématu: Rešerše možných způsobů měření a norem. Návrh postupu měření a metodiky měření volumetrické přesnosti osy A. Měření přesnosti otočné-sklopného stolu na stroji. Vyhodnocení výsledků formou modelu volumetrických chyb otočné - sklopného stolu. Výstupem budou data pro zadání SW kompenzací do CNC systému.; Rozsah textové části 60-80 stran.

Seznam doporučené literatury:

ČSN ISO 230-1: 2014 Zásady zkoušek obráběcích strojů-Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek, ICS 25.080.01 vyd. Praha: ÚNMZ, leden 2014; ČSN ISO 230-7: 2013 Zásady zkoušek obráběcích strojů-Část 7: Geometrická přesnost os za rotace, ICS 25.080.01 vyd. Praha: ÚNMZ, duben 2013; ČSN ISO 10791-2: 2005 Podmínky zkoušek pro obráběcí centra – Část 2: Zkoušky geometrické přesnosti strojů se svislou osou vřetena nebo s univerzálními hlavami se svislou primární osou otáčení (svislá osa Z), ICS 25.040. 10 vyd. Praha: ÚNMZ, červen 2005; ČSN ISO 10791-6: 2005 Podmínky zkoušek pro obráběcí centra – Část 6: Přesnost posuvů, frekvence otáčení a interpolací, ICS 25.040.10 vyd. Praha: ÚNMZ, červen 2005; ČSN ISO 10791-4: 2005 Podmínky zkoušek pro obráběcí centra – Část 4: Přesnost a opakovatelnost nastavení polohy v lineárních a otočných osách, ICS 25.040.10 vyd. Praha: ÚNMZ, červen 2005.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Machyl, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Karel Šnajdr, KOVOSVIT

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **21.07.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

Ing. Jan Machyl, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

30.4.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

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

.....

podpis

Poděkování

První velké poděkování patří vedoucímu mé práce, panu Ing. Janu Machylovi, Ph.D., za odborné vedení a cenné rady v průběhu tvorby celé diplomové práce. Zvláště oceňuji jeho kladný přístup a aktivní snahu pomoci za každých okolností. Při poděkování nesmím zapomenout ani na zbytek kolektivu Ústavu výrobních strojů a zařízení za užitečné rady během cvičných prezentací diplomové práce a bezproblémový průběh magisterského studia.

Poděkování patří i firmě Kovosvit MAS za poskytnutí stroje MCU 700 pro měření. Z firmy Kovosvit MAS patří jmenovité poděkování Ing. Karlu Šnajdrovi za konzultace jednotlivých měření a slečně Veronice Hejnové za velkou pomoc při domlouvání jednotlivých termínů měření a ovládání stroje při realizaci jednotlivých měření. Na závěr bych samozřejmě rád poděkoval i celé mé rodině a blízkým přátelům za podporu během studia a tvorby diplomové práce.

Anotace

<i>Jméno autora:</i>	Bc. Jiří Štecher
<i>Název DP:</i>	Analýza přesnosti otočného stolu MCU 700
<i>Rozsah práce:</i>	82 stran, 51 obrázků, 11 tabulek
<i>Školní rok vyhotovení:</i>	2019
<i>Škola:</i>	ČVUT – Fakulta Strojní
<i>Ústav:</i>	Ústav výrobních strojů a zařízení
<i>Vedoucí DP:</i>	Ing. Jan Machyl, Ph.D.
<i>Konzultant:</i>	Ing. Karel Šnajdr (Kovosvit MAS, a.s.)
<i>Zadavatel tématu:</i>	Kovosvit MAS, a.s.
<i>Využití:</i>	Návrh postupu měření přesnosti otočně – sklopného stolu na stroji MCU 700.
<i>Klíčová slova:</i>	otočně – sklopný stůl, pětiosé obráběcí centrum, měření geometrické přesnosti, analýza přesnosti obráběcích strojů, ISO 230;
<i>Abstrakt:</i>	Diplomová práce se zabývá analýzou přesnosti otočně – sklopného stolu multifunkčního pětiosého obráběcího centra MCU 700. Na základě provedené rešerše stávajících norem a metod měření byl stanoven vhodný postup měření přesnosti otočně – sklopného stolu se zaměřením na osu A. Podle zvoleného postupu bylo několikrát provedeno měření přímo na stroji MCU 700 ve firmě Kovosvit MAS. Naměřená data byla zpracována a následně vyhodnocena.

Annotation

<i>Author:</i>	Bc. Jiří Štecher
<i>Title:</i>	The accuracy analysis of the tilting rotary table of MCU 700
<i>Extent:</i>	82 pages, 51 figures, 11 tables
<i>Academic year:</i>	2019
<i>University:</i>	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
<i>Department:</i>	Department of Production Machines and Equipment
<i>Tutor:</i>	Ing. Jan Machyl, Ph.D.
<i>Consultant:</i>	Ing. Karel Šnajdr (Kovosvit MAS, a.s.)
<i>Submitter of the theme:</i>	Kovosvit MAS, a.s.
<i>Application:</i>	A procedure design of a tilting rotary table accuracy measurement on a machine MCU 700.
<i>Keywords:</i>	tilting rotary table, five – axis machining centre, geometric accuracy measurement, accuracy analysis of machine-tools, ISO 230;
<i>Abstract:</i>	The diploma thesis deals with an accuracy analysis of a tilting rotary table of a multifunctional five – axis machining centre MCU 700. The convenient approach to a tilting rotary table accuracy measurement focusing on A axis was created according to the research of existing standards and measurement methods. An accuracy measurement was performed on a machine MCU 700 in the company Kovosvit MAS. Measured values were compiled and evaluated.

Obsah

1	Cíl práce	12
2	Úvod.....	13
3	Měřený stroj MCU 700.....	15
4	Přehled norem pro měření přesnosti obráběcích strojů	18
4.1	ČSN ISO 230: Zásady zkoušek obráběcích strojů.....	18
4.2	ČSN ISO 10791: Podmínky zkoušek pro obráběcí centra	20
5	Metody měření přesnosti pětiosých obráběcích strojů	22
5.1	Klasické metody měření geometrické přesnosti	22
5.2	Laserový interferometr.....	24
5.3	Lasertracer / Laser tracker.....	27
5.4	Metoda „Chase the ball“	30
5.5	Měřicí sonda.....	32
5.6	Ballbar.....	32
5.7	Další způsoby měření přesnosti	34
6	Shrnutí rešeršní části	35
7	Měření stroje MCU 700	37
7.1	Měření přímosti os X, Y, Z.....	37
7.2	Měření kolmosti os X, Y, Z	40
7.3	Měření kinematiky	42
7.4	Měření chyby osy A	44
7.5	Polohování rotační osy A	47
8	Vyhodnocení naměřených dat	50
8.1	Vyhodnocení přímosti v ose X, Y, Z	50
8.2	Vyhodnocení vzájemné kolmosti os X, Y, Z.....	54
8.3	Vyhodnocení měření kinematiky.....	57

8.4	Vyhodnocení měření chyby osy A	61
8.5	Vyhodnocení chyby polohování osy A	67
9	Závěr	73
9.1	Zhodnocení diplomové práce.....	73
9.2	Další možný vývoj dané problematiky	74
	Seznam obrázků.....	76
	Seznam tabulek	78
	Seznam použitých zdrojů	79
	Seznam příloh.....	82

Seznam použitých symbolů, veličin a značek

Označení	Název veličiny	Jednotky
\bar{B}	Průměrná necitlivost v ose	°
A	Poloha osy A	°
A↑	Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose	°
A↓	Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose	°
A _A	Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose	°
B	Necitlivost v ose	°
C	Poloha osy C	°
DX	Parametr při měření kinematiky	mm
dx'	Úchylka při měření kinematiky v ose X	mm
dy'	Úchylka při měření kinematiky v ose Y	mm
DY1	Parametr při měření kinematiky	mm
DY2	Parametr při měření kinematiky	mm
DZ	Parametr při měření kinematiky	mm
dz'	Úchylka při měření kinematiky v ose Z	mm
E	Dvoustranná systematická polohová úchylky v ose	°
E↑	Jednostranná systematická polohová úchylky v ose	°
E↓	Jednostranná systematická polohová úchylky v ose	°
E ₁	Průběh přímosti	mm
E ₂	Průběh přímosti	mm
EAC	Úhlová chyba osy C	°
EBC	Úhlová chyba osy C	°
ECC	Chyba přesnosti polohování osy C	°

EKX	Výchylka při měření kolmosti v ose X	mm
EKXY	Chyba kolmosti os X a Y	mm/m
EKXZ	Chyba kolmosti os X a Z	mm/m
EKYZ	Chyba kolmosti os Y a Z	mm/m
EKZ	Výchylka při měření kolmosti v ose Z	mm
EXC	Radiální chyba osy C	mm
EXY	Chyba přímosti v ose Y	mm
EXZ	Chyba přímosti v ose Z	mm
EYC	Radiální chyba osy C	mm
EYX	Chyba přímosti v ose X	mm
EYZ	Chyba přímosti v ose Z	mm
EZC	Axiální chyba osy C	mm
EZX	Chyba přímosti v ose X	mm
EZY	Chyba přímosti v ose Y	mm
L	Délka měřeného úseku	mm
M	Průměrná dvoustranná polohová úchylky v ose	°
M_p	Úchylka přímosti referenčního povrchu pravítka	mm
MR_x	Referenční čára osy X	-
MR_y	Referenční čára osy Y	-
MR_z	Referenční čára osy Z	-
R	Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v ose	°
R[↑]	Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose	°
R[↓]	Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose	°
X	Poloha osy X	mm
x_{ij}	Polohová úchylka osy A	°
y	Pomocná proměnná při výpočtu přímostí	mm



Y	Poloha osy Y	mm
z	Lineární vyjádření úhlové chyby osy A	mm
Z	Poloha osy Z	mm
Δ_0	Chyba desky stolu	mm
δ_0	Chybový vektor osy A v pozici A = 0°	mm
Δ_{0Y}	Složka vektoru Δ_0 ve směru Y	mm
δ_{0Y}	Složka vektoru δ_0 ve směru Y	mm
Δ_{0Z}	Složka vektoru Δ_0 ve směru Z	mm
δ_{0Z}	Složka vektoru δ_0 ve směru Z	mm
δ_{-90}	Chybový vektor osy A v pozici A = -90°	mm
δ_{-90Y}	Složka vektoru δ_{-90} ve směru Y	mm
δ_{-90Z}	Složka vektoru δ_{-90} ve směru Z	mm
Δ_A	Chyba ustavení otočně – sklopného stolu	mm
Δ_{AY}	Složka vektoru Δ_A ve směru Y	mm
Δ_{AZ}	Složka vektoru Δ_A ve směru Z	mm

1 Cíl práce

Předmětem práce je návrh vhodného postupu měření přesnosti otočně – sklopného stolu pětiosého frézovacího centra MCU 700 s bližším zaměřením na chybu osy A. Zadavatelem diplomové práce je firma Kovosvit MAS. Dalším požadavkem zadávající firmy je stanovení vlivu zatížení otočně – sklopného stolu na konkrétní naměřené chyby osy A.

V úvodu práce bude vypracována rešerše se zaměřením na normy zabývající se měřením obráběcích strojů a metody vhodné pro měření daného konstrukčního uspořádání stroje. Na základě rešerše bude stanoven vhodný postup měření se zaměřením na osu A a na základě tohoto postupu bude poté provedeno měření přímo na stroji MCU 700 ve firmě Kovosvit Mas, a.s. Naměřená data budou zpracována a vyhodnocena. Výstupem měření kinematiky stroje budou softwarové kompenzace, které je možno implementovat do řídicího systému stroje. Součástí práce bude popis prováděných měření a postup při vyhodnocení naměřených dat. Závěrem práce bude zhodnocení výsledných úchylek vyplývajících z měření a jejich vlivu na výslednou přesnost otočně – sklopného stolu.

2 Úvod

S rozvojem technických oborů v posledních letech dochází k rozvoji technologií a zvyšují se nároky na účinnost strojů, všestrannost jejich využití a automatizaci jejich provozu. Ke zvyšování požadavků dochází i na straně obrobku. Jde zejména o zvyšující se tvarovou složitost dílců a jejich geometrickou přesnost. Spolu s těmito požadavky ale přichází ruku v ruce zvýšené nároky na přesnost stroje a jeho komponent. Právě tyto zmíněné důvody jsou příčinou stále širšího uplatnění pětiosých obráběcích strojů ve výrobě. Ty postupně vznikaly z tříosých frézovacích strojů na základě potřeb průmyslu a dle [1] se pětiosé stroje pohybují na špičce současného vývoje z hlediska pohonů souvisle řízených os, řízení nebo technologie.

Dle [2] jsou výhody pětiosých obráběcích strojů zejména:

- možnost obrobení složitých tvarů na jedno upnutí;
- menší množství upínek a přípravků;
- dobré nastavení polohy nástroje vzhledem k obrobku

Jednou ze stěžejních vlastností stroje je jeho geometrická přesnost. Autor [1] uvádí, že geometrická přesnost je před samotným seřízením stroje ovlivněna několika faktory. Prvním důležitým krokem je již samotný konstrukční návrh stroje a kvalita výkresové dokumentace jednotlivých dílců. S tím dále souvisí samotná přesnost výroby jednotlivých komponent (lineární vedení, kuličkové šrouby, uložení rotačních os, apod.) a jejich montáž. Výsledná přesnost stroje je tedy ovlivněna širokým spektrem chyb, které mají v konečné fázi vliv na kvalitu výsledného obrobku. Ing. Martin Morávek, Ph.D. [2] ve své práci uvádí s odkazem na [3] hlavní faktory ovlivňující geometrickou přesnost a chyby:

- geometrické chyby jednotlivých komponent stroje
- tuhost struktury při statickém zatížení
- teplotní chování komponent stroje
- dynamické chování stroje

První tři případy se nazývají kvazistatické zdroje chyb. Autoři [3] uvádí, že tyto chyby tvoří největší část z celkové chyby. Proto je jedním z hlavních úkolů měření a diagnostiky najít tyto chyby, určit jejich zdroj a snažit se je kompenzovat nebo zcela eliminovat. Toho lze docílit více metodami měření, které se vyvíjejí podobným tempem jako samotné obráběcí stroje. O vývoj v oblasti měření a diagnostiky se tedy zákonitě snaží i samotní výrobci strojů. Jedním z největších výrobců obráběcích strojů v České republice je firma Kovosvit Mas, a.s., která je původcem zadání této práce.

Společnost KOVOSVIT MAS a.s. je český výrobce obráběcích strojů sídlící v Sezimově Ústí v jižních Čechách. Počátky výroby obráběcích strojů se datují až do roku 1939, kdy firma začala vyrábět první obráběcí stroje. V té době vznikl název MAS, který znamenal zkratku pro Moravské a Slovenské strojírny. V průběhu let firma pokračovala ve vývoji stále nových strojů a reagovala na požadavky trhu. V současné době má KOVOSVIT MAS téměř 600 zaměstnanců a zákazníkům nabízí široké spektrum služeb v oblasti výroby obráběcích strojů. [4]

V nabídce firma KOVOSVIT MAS se nachází velké množství možností z oblasti obráběcích strojů. První velkou skupinou strojů jsou frézovací stroje. Vertikální frézovací centra jsou reprezentována linií MCV. Jedná se o tříosé frézovací stroje s rámem typu „C“. [5]. Dalším strojem, který lze zařadit do skupiny frézovacích strojů je portálové obráběcí centrum MMC 1500 se dvěma osami na straně nástroje.

Další důležitou skupinou obráběcích strojů jsou soustružnické stroje. Tuto linii strojů reprezentuje řada hrotových soustruhů MT a soustružnických center SP. Novinkou do portfolia společnosti je soustružnické centrum KL 285 představené na MSV 2018 v Brně.

Poslední důležitou skupinou jsou multifunkční stroje. Do této skupiny se řadí soustružnicko-frézovací centra linie MTC. Vedle těchto strojů se do této skupiny řadí linie pětiosých frézovacích center MCU. Do této skupiny patří i stroj MCU 700, na kterém bude probíhat měření otočně – sklopného stolu. Mezi další zajímavé projekty firmy KOVOSVIT MAS patří stroj WELDPRINT MCV 5X kombinující technologii navařování a obrábění. Tento stroj vznikl ve spolupráci s RCMT.

3 Měřený stroj MCU 700

Stroj MCU 700 je multifunkční pětiosé vertikální obráběcí centrum s konstrukcí typu horní gantry. Stroj je firmou Kovosvit MAS, a.s. nabízen ve dvou variantách. Varianta, která je určena jen pro frézování nese označení MCU 700V-5X. Druhá nabízená varianta je MCU 700VT- 5X, která umožňuje kromě frézování i soustružení. Na obrázku 3-1 je zobrazen design krytování stroje MCU 700 typický pro stroje firmy KOVOSVIT MAS. [6]



Obrázek 3-1 - Multifunkční pětiosé obráběcí centrum MCU 700 [7]

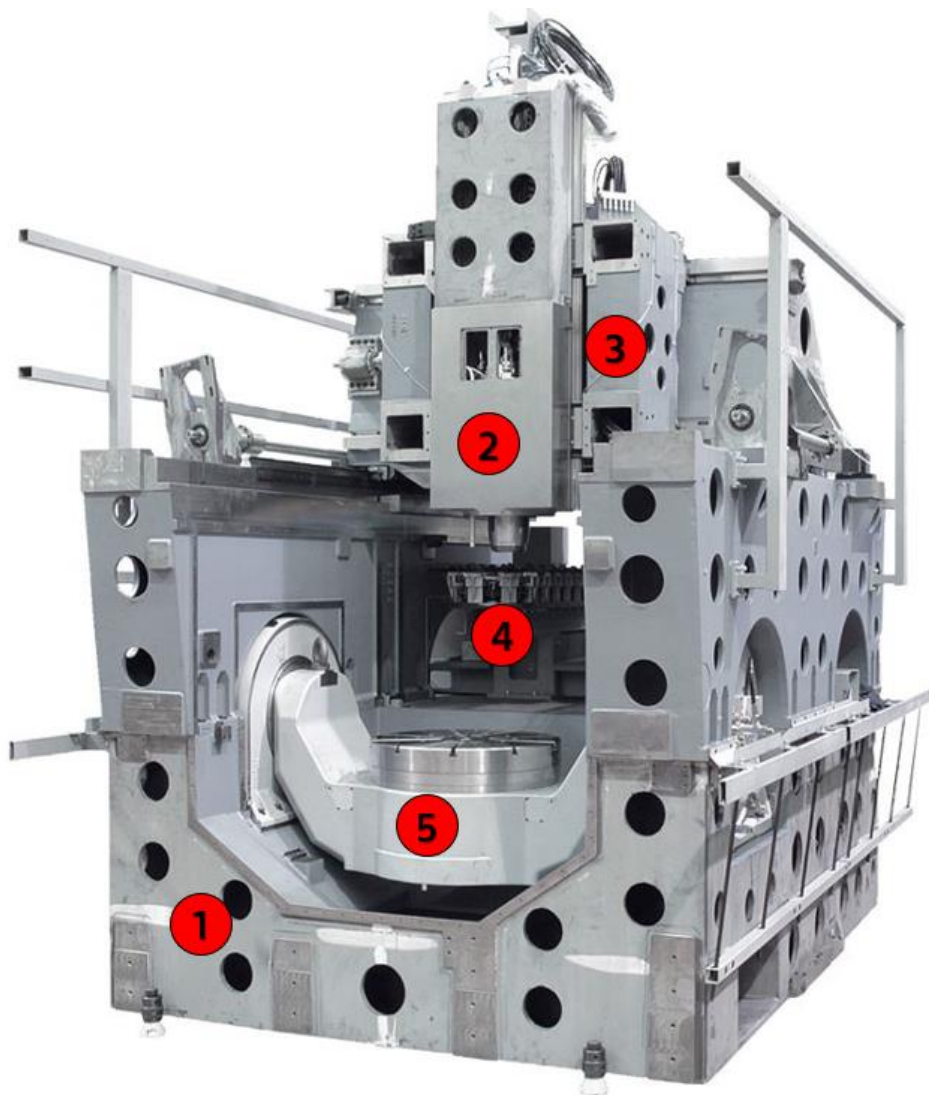
V tabulce 3-1 jsou uvedeny vybrané parametry stroje MCU 700. Kompletní tabulka parametrů stroje je k nahlédnutí v příloze diplomové práce.

Vybrané parametry stroje MCU 700		
Pojezd v osách X/Y/Z	700/820/550	[mm]
Rychloposuv v osách X/Y/Z	60	[m/min]
Maximální \varnothing obrobku	1000	[mm]
Maximální výška obrobku	500	[mm]
Maximální hmotnost obrobku	850	[kg]

Tabulka 3-1 - Parametry stroje MCU 700 [6]

Další parametry stroje jako otáčky vřetena, výkon pohonu nebo typ upínání záleží na zvoleném typu stroje. Stroj MCU 700 je nabízen ve variantách POWER, SPEED, SPRINT nebo RAPID podle použitého vřetena. Měření provedené v této práci bylo provedeno na stroji s označením SPEED. [6]

Pro lepší ilustraci měřeného stroje slouží obrázek 3-2. Na tomto obrázku je stroj zobrazen bez krytování pro lepší představu jednotlivých částí stroje. Jako číslo **1** je na obrázku označeno lože stroje. Číslo **2** zobrazuje smykadlo s vřetenem, číslo **3** představuje saně a jako číslo **4** je označen zásobník nástrojů pro automatickou výměnu. Tato práce se zabývá otočně – sklopným stolem označeným číslem **5**. [6]



Obrázek 3-2 - Konstrukce skeletu stroje MCU 700 [6]

Rotační osy A a C stolu jsou poháněny prstencovými motory bez vložených převodů, které s sebou obvykle nesou negativní účinky v podobě vůlí. Zpevnění na požadované poloze zajišťuje u obou rotačních os hydraulická brzda. Poloha os je odměřována přímým odměřováním na obou osách. V tabulce 3-2 jsou uvedeny parametry rotačních os A a C otočně – sklopného stolu.

Parametry otočně – sklopného stolu MCU 700		
Rozsah otáčení osy A	150 (+30/-120)	[°]
Rozsah otáčení osy C	neomezeně	[°]
Maximální otáčky osy A	25	[min ⁻¹]
Maximální otáčky osy C	100 ¹⁾	[min ⁻¹]
Přesnost dělení os A, C	0,001	[°]

Tabulka 3-2 - Parametry otočného stolu [6]

¹⁾ Pozn.: Pro verzi stroje MCU 700VT – 5X, která je schopna soustružit, jsou maximální otáčky osy C až 500 min⁻¹. [6]

Na dalším obrázku 3-3 je již zobrazen přímo měřený stroj MCU 700V – 5X SPEED (sériové číslo 103) ve firmě Kovosvit MAS:



Obrázek 3-3 - Stroj MCU 700V - 5X SPEED ve firmě Kovosvit MAS

4 Přehled norem pro měření přesnosti obráběcích strojů

4.1 ČSN ISO 230: Zásady zkoušek obráběcích strojů

Mezinárodní norma ISO 230 specifikuje zkoušky obráběcích strojů a vyhodnocení naměřených dat. Tato norma platí obecně pro různé typy strojů a neuvádí konkrétní tolerance pro konkrétní stroje. Celá norma je dle vydání normy ISO 230-1 [7] z roku 2014 rozdělena do 11 částí podle typu zkoušky:

- Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek
- Část 2: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách obráběcích strojů
- Část 3: Určení tepelných vlivů
- Část 4: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů
- Část 5: Stanovení emise hluku
- Část 6: Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn (Zkouška diagonálního přestavení)
- Část 7: Geometrická přesnost os rotace
- Část 8: Určení úrovně vibrací
- Část 9: Odhad nejistoty měření pro zkoušky obráběcích strojů podle série ISO 230, základní rovnice
- Část 10: Určení měřicích vlastností snímacích systémů číslicově řízených obráběcích strojů
- Část 11: Měřicí přístroje a jejich aplikace pro zkoušky geometrie obráběcích strojů (*Tato část normy se připravuje*)

Současně s vývojem strojů se do této normy přidávají další části podle aktuální potřeby. V další části jsou blíže popsány části normy ISO 230, které se zabývají měřením geometrické přesnosti obráběcích strojů a dají se použít na měření víceosých obráběcích strojů.

Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek ČSN ISO 230-1

První část normy ISO 230 [7] uvádí metody pro měření přesnosti obráběcích strojů. Důležitý je předpoklad, že stroje pracují bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek (dokončovacích podmínek obrábění). Předmětem normy jsou geometrické zkoušky jak lineárních os, tak i os rotačních. Norma se nezabývá samotným měřením otočně – sklopného stolu, ale jako rotační osy uvažuje vřetena a otočné stoly. Na konkrétních příkladech uvádí měření jednotlivých chyb rotačních os. V normě jsou okrajově zmíněny i zkoušky, které se používají pro měření víceosých strojů. Jde především o R-test nebo zkoušky pomocí soupravy Ballbar. Tyto moderní metody jsou dále popsány v kapitole 5, která se zabývá konkrétními metodami měření víceosých obráběcích strojů

Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách ČSN ISO 230-2

Tato část normy [8] definuje zkoušky a přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách obráběcích strojů a jejich vyhodnocení. Metody popsané v této normě se vztahují na lineární i rotační osy. Norma se tedy dá aplikovat i na měření přesnosti polohování otočně-sklopných stolů.

V normě jsou nejprve definovány všechny vztahy a definice potřebné pro vyhodnocení naměřených dat. V další části jsou uvedeny doporučené podmínky pro provádění příslušných zkoušek. Norma uvádí doporučené hodnoty teploty a další doporučení pro omezení dalších nejistot vnášených do měření. Dále se norma zmiňuje i o samotném stroji a konfiguraci os při měření. V neposlední řadě je v normě zmínka o ohřátí stroje. Ve všech částech definujících podmínky měření autoři zmiňují, že dodavatel nebo výrobce stroje by měl blíže definovat doporučené podmínky pro splnění garantované přesnosti stroje. Z těchto podmínek by následně mělo vycházet i vlastní měření přesnosti polohování.

Geometrická přesnost os rotace ČSN ISO 230-7

Tato část normy ISO 230 definuje metody měření geometrické přesnosti os rotace vřeten, rotačních hlav a naklápěcích stolů obráběcích strojů. Norma se zabývá chybnými pohyby os rotace, měřením těchto chyb a následným vyhodnocením naměřených dat.

4.2 ČSN ISO 10791: Podmínky zkoušek pro obráběcí centra

Soubor norem ČSN ISO 10791 je určen speciálně pro měření obráběcích center. V mnoha případech se odkazuje na jednotlivé části normy ISO 230, ale již specifikuje konkrétní zkoušky a tolerance pro konkrétní konfigurace obráběcích strojů. Stejně jako norma ISO 230 je norma ČSN ISO 10791 rozdělena na jednotlivé části dle typu zkoušky. Dle vydání normy ČSN ISO 10791-4 z roku 2005 jsou to tyto části:

- Část 1: Zkoušky geometrické přesnosti strojů s vodorovnou osou vřetena a s hlavami jako příslušenstvím (vodorovná osa Z)
- Část 2: Zkoušky geometrické přesnosti strojů se svislou osou vřetena nebo s univerzálními hlavami se svislou primární osou otáčení (svislá osa Z)
- Část 3: Zkoušky geometrické přesnosti strojů s integrovanými indexovatelnými nebo souvisle řízenými univerzálními hlavami (svislá osa Z)
- Část 4: Přesnost a opakovatelnost nastavení polohy v lineárních a otočných osách
- Část 5: Přesnost a opakovatelnost nastavení polohy obrobkových palet
- Část 6: Přesnost posuvů, otáček a interpolací
- Část 7: Přesnost dokončovaného zkušebního obrobku
- Část 8: Vyhodnocení vlastní interpolace ve třech souřadných rovinách
- Část 9: Vyhodnocení doby výměny nástrojů a výměny palet
- Část 10: Vyhodnocení tepelných deformací
- Část 11: Vyhodnocení emise hluku
- Část 12: Vyhodnocení závažnosti vibrací

Dále budou popsány části normy, které se zabývají měřením přesnosti rotačních os a lze je aplikovat na měření pětiosých obráběcích strojů

Zkoušky geometrické přesnosti strojů se svislou osou vřetena nebo s univerzálními hlavami se svislou primární osou otáčení (svislá osa Z) ČSN ISO 10791-2

Předmětem druhé části normy ČSN ISO 10791 [9] jsou zkoušky geometrické přesnosti obráběcích center se svislou osou vřetena s odkazem na normu ISO 230-1 [7]. Odkaz na normu ISO 230-1 se týká především podmínek zkoušek jako ustavení stroje, ohřátí vřetena a doporučené přesnosti měření.

V normě jsou postupně popsána schémata a postupy pro měření geometrických chyb pohybů obráběcího centra. Jedná se zejména o měření přímočarostí lineárních pohybů, úhlových odchylek lineárních pohybů, kolmostí pohybů, házení, rovinnosti apod. Norma také uvádí doporučené mezní tolerance jednotlivých naměřených veličin.

Přesnost a opakovatelnost nastavení polohy v lineárních a otočných osách ČSN ISO 10791-4

Čtvrtá část normy ČSN ISO 10791 [10] vychází z normy ISO 230-2 [8]. Rozdílem je specifikace pro obráběcí centra. Norma specifikuje tolerance pro nastavování polohy rotačních a lineárních os obráběcích center. Pro detailnější popis metod měření a jednotlivých veličin je nutné vyhledat normu ISO 230-2, norma ČSN ISO 10791-4 uvádí jen formu vyhodnocení dat a mezní tolerance.

Přesnost posuvů, otáček a interpolací ČSN ISO 10791-6

Důležitou součástí zkoušek pětiosých obráběcích strojů jsou zkoušky interpolace pohybových os. Předmětem šesté části normy [11] je mimo jiné právě definice metody měření přesnosti dráhy vytvořené sférickou interpolací pohybů v pěti osách. Jsou zde definovány proměřované polohy, doporučené měřicí přístroje a další poznámky k této metodě měření.

5 Metody měření přesnosti pětiosých obráběcích strojů

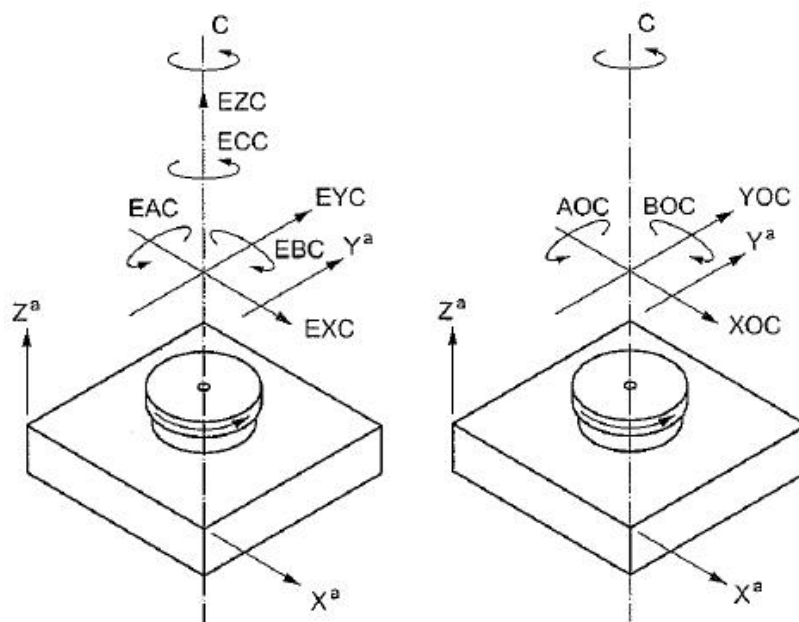
5.1 Klasické metody měření geometrické přesnosti

Dle [12] se klasické metody měření geometrické přesnosti (respektive chyb) často označují jako Schlesingerovy metody. Název těchto metod pochází ze 30.let 20.století, kdy německý technik Dr.Schlesinger systematicky definoval měření přesnosti obráběcích strojů při přejímce zákazníkem a položil tím ucelené základy pro měření geometrické přesnosti obráběcích strojů. Základy a principy těchto měření se úspěšně dodnes používají.

Ing. Ondřej Svoboda, Ph.D. v článku [1] uvádí popis základních měření pomocí přesné libely, číselníkového úchylkoměru, přesného pravítka a měřícího trnu. Jako prvotní část měření by měla být provedena kontrola správného ustavení stroje pomocí libely. Poté následují další části měření jako je kontrola čelního házení plochy stolu, házení upínací dutiny vřetena apod. Důležitou součástí jsou zkoušky přímosti a vzájemné kolmosti jednotlivých pohybových os. Tato měření jsou obecně definována v normě ISO 230-1. Pro obráběcí centra jsou tyto zkoušky upřesněny v části normy ČSN ISO 10791-2.

Znalost jednotlivých chyb pohybových os je důležitá pro určení celkové geometrické přesnosti obráběcího stroje. V případě pětiosých strojů je ale velmi důležitá současná interpolace rotačních a lineárních os. Autor [1] zdůrazňuje, že pro správnou funkci stroje je nutné znát skutečnou polohu středů otáčení rotačních os. Pokud se skutečná poloha liší od polohy zadané v řídicím systému, bude stroj interpolovat s určitou chybou.

Pro každou rotační osu můžeme obecně definovat 6 chyb pohybu (EXC, EYC, EZC, EAC, EBC, ECC). Na obrázku 5-1 vlevo jsou tyto chyby zobrazeny, vpravo jsou pak zobrazeny chyby umístění a orientace osy vůči ostatním strojním osám. Dle [2] zpravidla získáváme jednotlivými měřeními postupně jednotlivé geometrické chyby. Z toho vyplývá časová náročnost těchto měření. Přesto mají tato měření díky své jednoduchosti stále v oboru měření své nezastupitelné místo.



Obrázek 5-1 - Geometrické chyby rotačních os [13]

Dle [2] a [13] lze axiální chybu EZC a radiální chyby EXC a EYC určit pomocí číselníkového úchylkoměru ve středovém otvoru rotačního stolu, případně za pomoci přesného měřicího artefaktu. Lze použít i přesnější senzory. Úhlové chyby EAC a EBC lze určit pomocí dvou úchylkoměrů. Autor [2] uvádí: „Pro měření úhlových chyb (EAC a EBC) je třeba užít dvou číselníkových úchylkoměrů, ustavených v jedné rovině společně s osou otáčení rotační osy a kolmé na osu otáčení měřené chyby.“

Chyba ECC je chyba v přesnosti polohování. Měření a vyhodnocení těchto chyb je popsáno v normě ISO 230-2, respektive ČSN ISO 10791-4. Tato chyba lze určit pomocí laserového interferometru s rotační hlavou, viz kapitola 5.2 a systémy výrobců Optodyne nebo Renishaw.

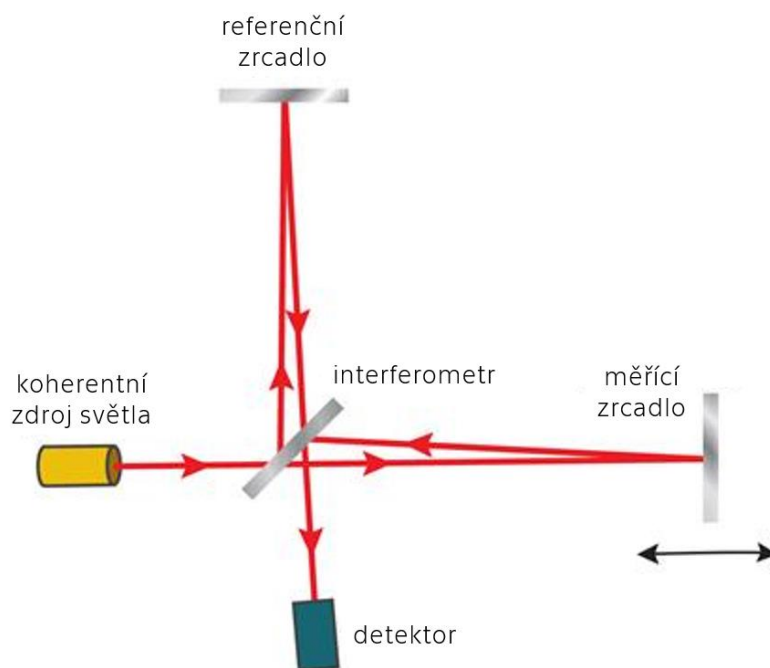
Jak už bylo zmíněno, klasické metody měření geometrických chyb mají velkou nevýhodu v podobě časové náročnosti měření a náročnosti na správné provedení měření. Proto se v průběhu času vyvinulo mnoho modernějších metod, které velmi ulehčují práci obsluze provádějící měření a zároveň neztrácejí na přesnosti určení chyby. Moderní přístroje ve většině případů vyhodnocují větší množství chyb najednou a jejich časová náročnost je tudíž menší.

5.2 Laserový interferometr

Interferometrie je měřící metoda, která využívá principu interference vlnění. Tento princip je využíván pro měření vzdálenosti na základě vyhodnocení interference dvou paprsků.

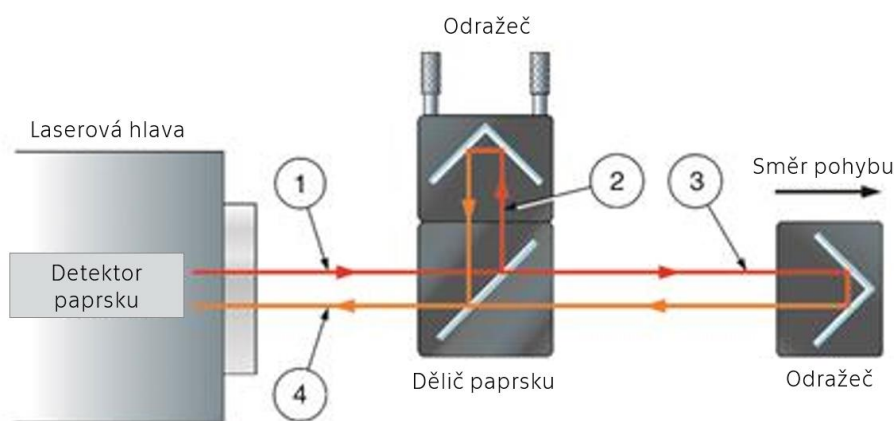
První přístroj, který využíval principu interferometrie se objevil roku 1887, kdy Američan Albert Abraham Michelson vytvořil systém zrcadel a polopropustných zrcadel. Ty slučovaly rozdělené paprsky světla vycházející ze stejného zdroje. Interferometry v dnešní době využívají stále stejný princip. [14]

Na obrázku 5-2 je popsán základní princip Michelsonova interferometru. Skládá se z polopropustného zrcadla (děliče paprsku) a dvou zrcadel – měřícího a referenčního. Ze zdroje světla vychází paprsek, který je na polopropustném zrcadle rozdělen do dvou paprsků. Jeden paprsek míří na referenční zrcadlo a druhý na měřící zrcadlo. Od zrcadel se oba paprsky odrazí zpět a na polopropustném zrcadle se sloučí a výsledný paprsek je odražen do detektoru. Rozdíl vzdáleností obou paprsků zapříčiní fázový posuv mezi paprsky. Fázový posuv vytvoří interferenční obrazec, který je vyhodnocen detektorem. Detektor poté vyhodnotí na základě tohoto obrazce požadovanou veličinu, která změnila fázi – v našem případě posun měřícího zrcadla.



Obrázek 5-2 - Michelsonův interferometr [14]

Na dalším obrázku 5-3 je popsán princip laserového interferometru XL-80 firmy Renishaw. Z laserové hlavy vychází paprsek 1 a je rozdělen na děliči paprsku na dva paprsky 2 a 3. Tyto paprsky jsou na odražeči odraženy zpět a před dopadem na detektor interferují. Detektor poté vyhodnocuje na základě interferenčních obrazců posunutí pohybujícího se odražeče.



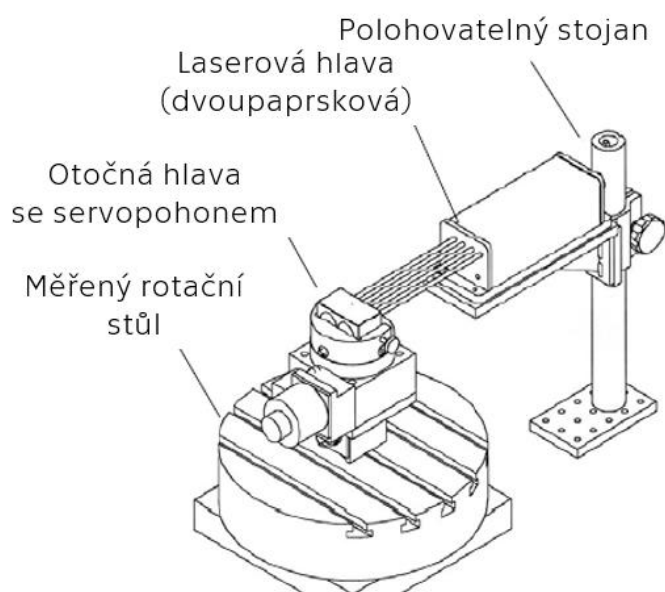
Obrázek 5-3 - Princip laserového interferometru XL-80 [14]

Z principu, který byl výše popsán, vyplývá, že pomocí laserového interferometru lze se znalostí vlnové délky a času měřit délku a její změnu. Pomocí tohoto principu lze ale měřit i úhlová odchylka. Dále budou popsány systémy dvou výrobců, kteří tento princip u své aparatury využívají.

Systém Optodyne

Na obrázku 5-4 je uvedeno zjednodušené schéma aparatury od firmy Optodyne pro měření přesnosti a opakovatelnosti polohování rotačních os. Základem aparatury je zdroj koherentního laserového paprsku, který je upevněn na polohovatelném stojanu. Laserový paprsek je namířen na zrcátko, které je upevněno v rotační hlavě. Princip jevu je zobrazen na obrázku 5-2. Rozdílem je přepočtení délkové odchylky na úhlovou. Pohyb rotačního stolu je naprogramován tak, aby se pootáčel o úhel maximálně 10° . Po pootočení se zaznamená odchylka skutečně a požadované hodnoty a servomotor otočné hlavy natočí hlavu zpět do nulové hodnoty. Tento postup se opakuje pro celý měřený rozsah. Výstupem ze softwaru jsou odchylky od požadované polohy pro měřený rozsah otáčení. Přesnost udávaná výrobcem v [15] je $\pm 0,2$ arcsec a maximální rozsah pro jedno pootočení je $\pm 10^\circ$.

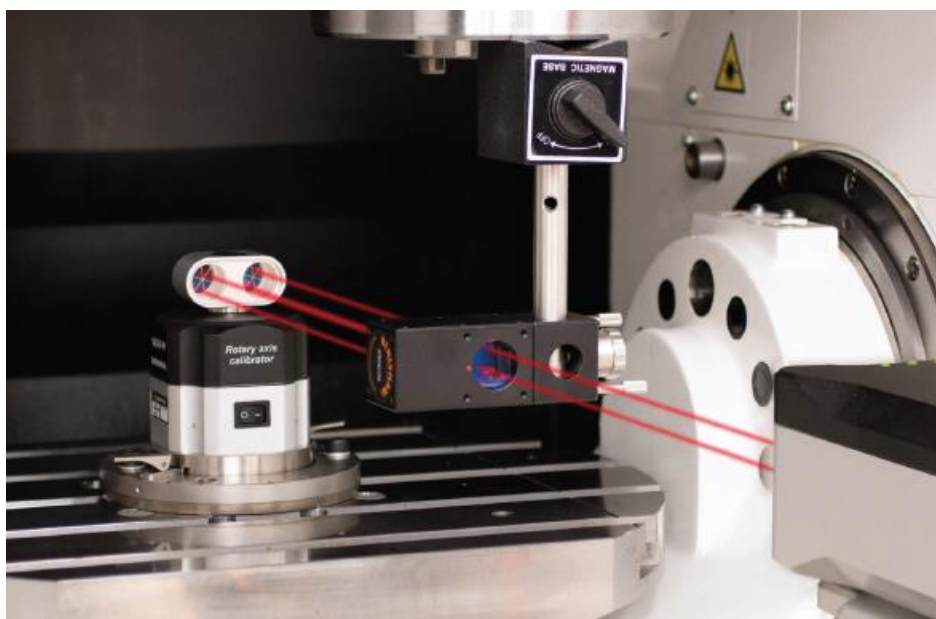
Vzhledem k přítomnosti aparatury Optodyne v RCMT mohla být změřena přesnost polohování otočné osy A na stroji HAAS. Pomocí tohoto měření přímo na stroji v RCMT byla otestována možnost použití aparatury pro měření na stroji MCU 700. Rozdíl této aparatury oproti schématu 5-4 je pohon rotační hlavy. Ten je manuální, což s sebou přináší nutnost manuálně přestavovat otočnou hlavu zpět do nulové hodnoty po každém pootočení. Kvůli této nevýhodě a možnosti použít aparaturu Renishaw nebyla nakonec aparatura Optodyne shledána vhodnou pro měření v této diplomové práci.



Obrázek 5-4 - Základní schéma aparatury Optodyne RT100 [15]

Systém Renishaw XR-20 W

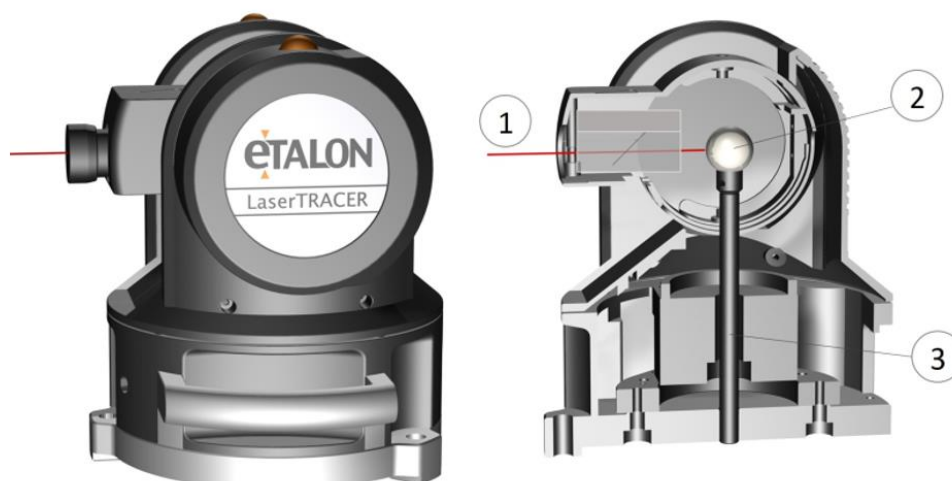
Princip měření firmy Renishaw je stejný jako u aparatury od firmy Optodyne. Na obrázku 5-5 je zobrazeno uspořádání aparatury při měření. To je stejné jako u předešlého systému Optodyne. Výhodou je poháněná otočná hlava, která nevyžaduje spolupráci obsluhy. Firma Renishaw mimo základní aparatury nabízí i mnohá rozšíření, která se dají velmi dobře aplikovat při měření pětiosých obráběcích strojů. Takovým rozšířením je například souprava pro měření mimo osu rotace, pokud není možné upevnit přístroj přímo do osy rotace. Toto rozšíření je použitelné pro měření pětiosých obráběcích strojů, protože u otočně – sklopných stolů se dvěma rotačními osami nemusí být vždy montáž měřící hlavy možná přímo do osy rotace. [16] Přesnost uváděná výrobcem v [16] je ± 1 arcsec při 20°C.



Obrázek 5-5 - Systém XR-20-W firmy Renishaw [16]

5.3 Lasertracer / Laser tracker

Lasertracer je zařízení firmy ETALON AG, které pracuje na principu laserového interferometru (popsán v kapitole 5.1). Výhodou oproti systémům Optodyne nebo Renishaw je polohovací zařízení, které je schopno měřit ve 3D v celém rozsahu pracovního prostoru stroje. To zajišťuje lasertracer, který automaticky sleduje koutový odražeč. Na obrázku 5-6 je zobrazeno schéma lasertraceru s popisem jeho součástí. Dle [17] představuje číslo 1 paprsek záření, číslo 2 referenční kouli a číslo 3 pevný čep s nízkou tepelnou roztažností.



Obrázek 5-6 - Lasertracer firmy ETALON AG [17]

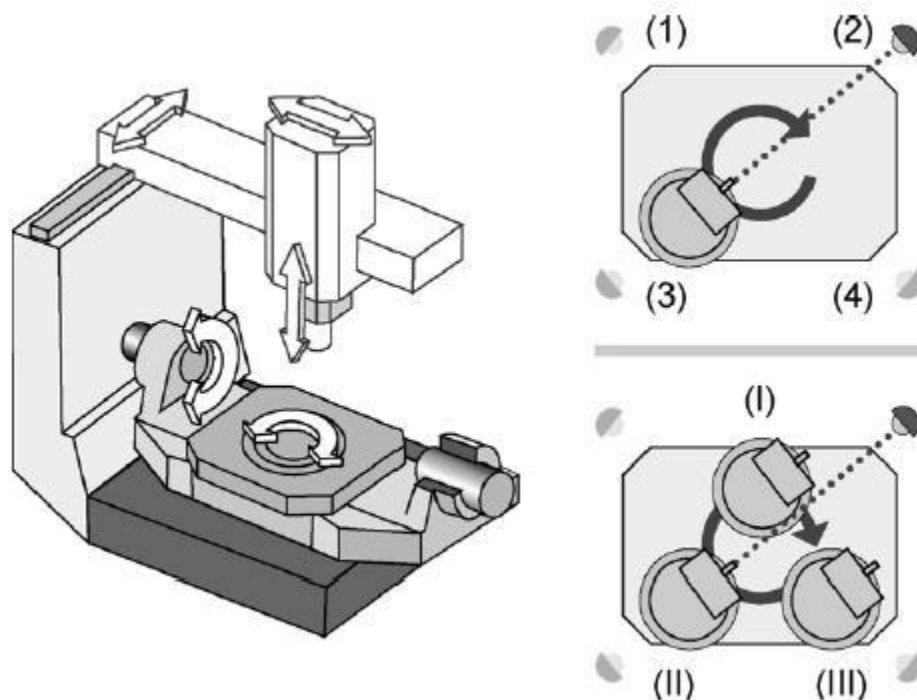
Samotné měření je založeno na měření vzdálenosti mezi zdrojem laserového paprsku a zrcátkem upevněným na měřenou osu během naprogramovaných pohybů pohybových os obráběcího stroje. Schéma konfigurace je naznačeno na obrázku 5-7. Ve vřetení je místo nástroje upnut držák s odražečem laserového paprsku. Na rotační kolébce je upevněna polohovací hlava se zdrojem laserového paprsku. V závislosti na měřených osách se pak konfigurace může měnit. Zrcátko je možné upevnit na rotační stůl, zdroj paprsku na stojan mimo stroj a poté měřit přesnost polohování rotačního stolu. [17]



Obrázek 5-7 - Konfigurace při měření Lasertracerem [17]

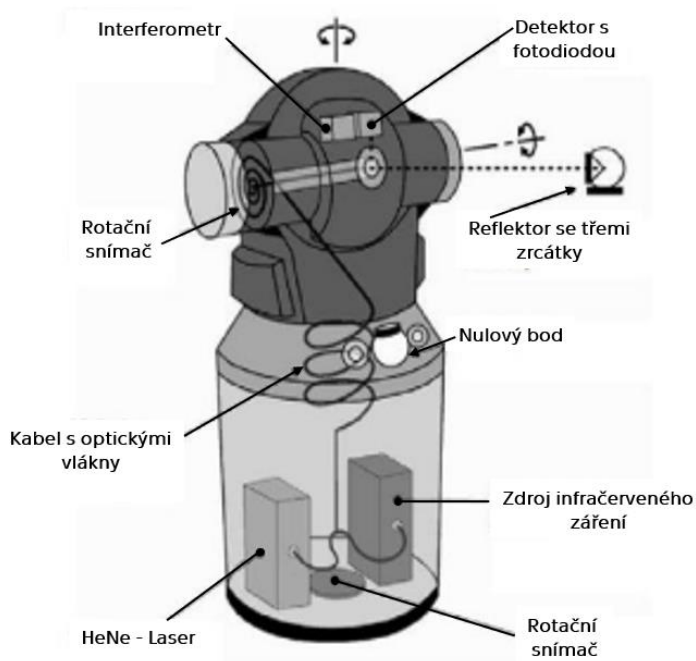
Dle [18] může konfigurace pro měření a kalibraci rotačních os pětiosého stroje vypadat jako na obrázku 5-8. Lasertracer je upevněn na rotačním stole (poloha I) a koutový odražeč je upevněn na místě nástroje. Odražeč je polohován do čtyř různých poloh v pracovním prostoru (polohy 1, 2, 3, 4) a pro každou tuto polohu se otočí stůl s lasertracerem o 360°. Při otáčení lasertracer zaznamenává vzdálenost mezi zdrojem paprsku a odražečem. Stejný postup následuje pro další dvě polohy lasertraceru na rotačním stole (polohy II, III). Autoři [18] dále uvádějí, že porovnání geometrických chyb naměřených touto metodou a klasickými metodami se shodují ve velké míře.

Velkou výhodou lasertraceru je čas měření. Dle [2] je zařízení schopné kompletně kalibrovat pětiosý obráběcí stroj do dvou hodin bez nutnosti dalšího vybavení.



Obrázek 5-8 - Konfigurace pro kalibraci rotačních os stroje [18]

Laser tracker je zařízení velmi podobné výše popsanému lasertraceru. Liší se principem určování polohy v prostoru. Poloha je určena dvěma úhly a jednou vzdáleností. Úhly jsou určeny pomocí rotačních snímačů na laser trackeru a vzdálenost je určena pomocí laserového odměřování na principu interference. Jednotlivé části laser-trackeru jsou popsány na obrázku 5-9:



Obrázek 5-9 - Schéma laser-trackeru [19]

S principem určování polohy v prostoru souvisí i vhodnost použití laser-trackeru pro měření přesnosti pětiosých obráběcích strojů. Dle [2] není tento princip pro toto měření příliš vhodný. V porovnání s lasertracerem má laser-tracker nezanedbatelně nižší přesnost. Autor [2] uvádí, že přesnost odměřování polohy při uvažování úhlů se pohybuje od 0,02 do 0,03 mm, přesnost odměřování vzdálenosti je asi 1 μ m. Přesnost stacionárního měření laser trackerem lze dle autora [2] zvýšit pomocí opakovaného nájezdu do stejné polohy.

5.4 Metoda „Chase the ball“

Tento způsob měření využívá současného pohybu všech pěti os stroje. Na obrázku 5-10 je zobrazen příklad aparatury od firmy IBS. Obvykle se používá konfigurace stejná jako na obrázku 5-10. Na stole je upevněn držák s přesnou referenční koulí. V nástrojovém držáku vřetena je upevněna snímací hlava osazená kapacitními snímači. Měření probíhá tak, že dvojice rotačních os natáčí stůl s koulí do různých poloh pracovního prostoru stroje. Pohyb lineárních os je programován tak, aby snímací hlava kopírovala pohyb koule. Snímací hlava pak měří skutečnou polohu středu koule v pracovním prostoru v souřadnicích X, Y a Z. Systém je poté schopný vyhodnotit odchylku požadované a skutečné polohy středu referenční koule. [20] [21]

Výrobce IBS uvádí v [21] i konkrétní aplikace své aparatury v praxi. Svůj výrobek prezentuje jako velmi efektivní prostředek pro měření při přejímce stroje a ověření kinematické přesnosti stroje. Často je používáno testování dle normy ISO 10971-6, která definuje podmínky pro testování obráběcích center. Aparaturu lze použít i pro různé konfigurace pohybových os stroje.

Jiná metoda měření pomocí aparatury umožňuje stanovit přesnost úhlového polohování otočného stolu. Stroj je naprogramován tak, aby rotačním stolem indexoval po určitých úhlových inkrementech. Lineární osy, které nesou snímací hlavu, jsou naprogramovány tak, aby sledovaly otáčení rotačního stolu s referenční koulí. Výstupem měření jsou výsledky vztažené k souřadnému systému stroje a je možné je přímo zadat do řídicího systému v podobě kompenzací. [21]

Třetí možností aplikace aparatury je testování dynamických vlastností stroje. Systém je schopný určit přesnost daných trajektorií, které jsou realizovány současným pohybem dvou nebo více os. Tato aplikace je důležitá, protože pomocí standardních měření pro kalibraci os nelze získat data dynamických měření. Další výhodou je minimální doba trvání v řádu minut.

Hlavní výhodou zmíněného systému je jednoduchost a komplexnost prováděných měření. Výstup měření je možno rovnou implementovat do řídicího systému v podobě kompenzací, což ušetří mnoho času. Mimo jiné lze porovnávat i výsledky statických a dynamických měření. [21]



Obrázek 5-10 - Aparatura firmy IBS pro měření pětiosých strojů [20]

Na trhu se vyskytují i další výrobci, kteří nabízejí aparatury fungující na podobném principu jako sestava firmy IBS. Liší se typem snímačů na snímací hlavě, vyhodnocovacím softwarem nebo konstrukcí referenční koule.

5.5 Měřící sonda

Uspořádání měření pomocí měřící sondy je velmi podobné metodě „Chase the ball“. Princip měření zůstává stejný, mění se jen typ snímání polohy koule. Ke snímání výchylky v jednotlivých směrech při natáčení rotačních os je použita dotyková sonda, která je upnuta v nástrojové dutině vřetene. Na trhu existuje několik řešení od různých výrobců. Příkladem je firma Hexagon se svým produktem NC Gage [22] nebo AxiSet od firmy Renishaw [23]. Toto řešení je zobrazeno na obrázku 5-11. Na stole je upnuta přesná referenční koule, která se natáčí spolu s osami A a C. Dotyková sonda s jednotkou je upnuta ve vřetení a snímá výchylku. Dalšími produkty využívajícím 3D dotykovou sondu jsou opce do řídicího systému KinematicsOpt od firmy Heidenhain nebo 5axis auto tuning system od výrobce obráběcích strojů Okuma.



Obrázek 5-11 - Měření pomocí aparatury AxiSet od firmy Renishaw [23]

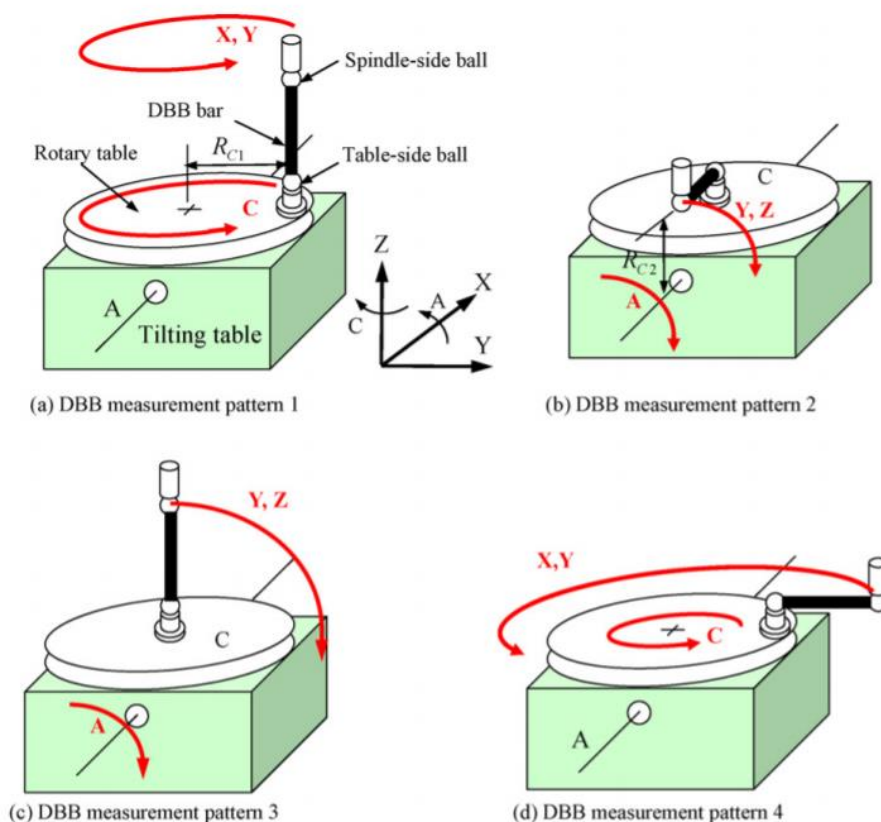
Další možností, která funguje na stejném principu, je upnutí držáku úchylkoměrů do dutiny vřetena a manuální odečítání hodnot v každém měřeném pootočení rotačních os.

5.6 Ballbar

Mezi další metody, které se dají použít pro měření přesnosti pětiosých obráběcích strojů, patří měření aparaturou Ballbar. Ballbar se skládá ze dvou přesně vyrobených kuliček, které jsou spojeny pouzdem měřícím skutečnou vzdálenost kuliček. Jedna z kuliček je upevněna v držáku nástroje ve vřetení a druhá je upnuta na stole. Pohyby stroje jsou

naprogramovány tak, aby byla udržována konstantní vzdálenost kuliček. Systém pak vyhodnocuje skutečnou vzdálenost a zaznamená odchylku. Standardně se aparatura Ballbar používá pro měření kruhové interpolace dvou lineárních os obráběcího stroje dle ISO 230-4. Dle [2] lze tuto metodu použít i pro měření geometrických chyb obráběcích strojů.

Příkladem měření pomocí metody Ballbar je případová studie autorů [24]. Ve své práci popisují způsob určení jednotlivých chyb pohybových os pětiosého stroje pomocí aparatury Ballbar. Schematicky je toto měření znázorněno na obrázku 5-12. Principem je interpolace dvou lineárních os a jedné rotační při naprogramovaných trajektoriích pohybu. Takto jsou provedena čtyři měření jako na obrázku 5-12. V případě měření 1 je Ballbar ustaven rovnoběžně s osou rotace C. Současně jsou pak řízeny pohyby os X a Y a rotační osy stolu C. Na stejném principu fungují všechna čtyři měření, rozdílem je jen konfigurace os v závislosti na měřené veličině. Na základě těchto měření je poté možné zjistit jednotlivé chyby lineárních a rotačních os.

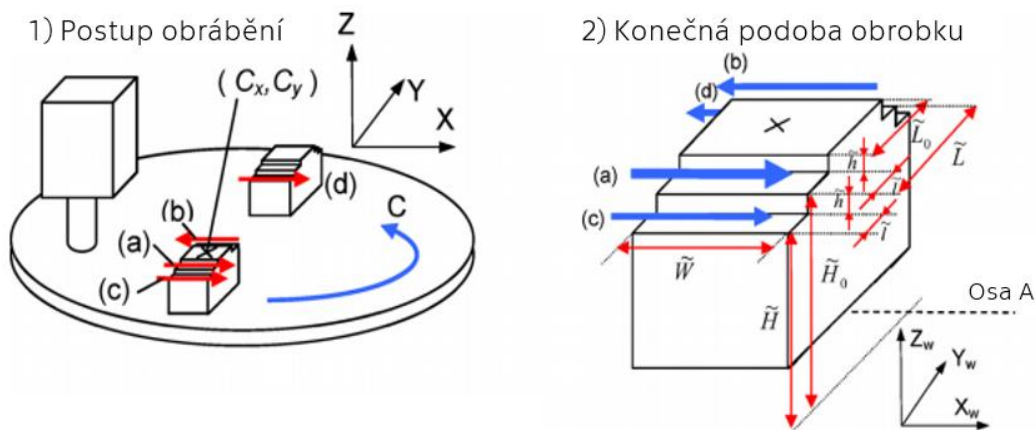


Obrázek 5-12 - Měření pomocí aparatury Ballbar [24]

5.7 Další způsoby měření přesnosti

Dalším způsobem určení přesnosti stroje, který zmiňuje Ing. Martin Morávek [2] ve své práci, je zkušební obrobek. Jeho výhodou je především možnost přímého zhodnocení vlivu přesnosti na výslednou jakost obrobku. Blíže se této problematice věnuje norma ČSN ISO 10791-7.

Příkladem této metody je práce autorů Ibaraki a kol. [25], kteří ve svém článku uvádějí sérii 11 obráběcích vzorů na jednoduchém obrobku, které jsou postupně frézovány v různých polohách rotačních os. Následně jsou nepřesnosti obrobené plochy vyhodnoceny a jsou určeny jednotlivé geometrické chyby. Pro určení všech kinematických chyb není podle autorů nutné provést všechny zkoušky obrábění. Ve své práci dále diskutují nad volbou vhodných obráběcích vzorů. V této práci bude uveden pouze příklad jednoho z obráběcích vzorů na obrázku 5-13. Osy A a C jsou na počátku zkoušky v poloze 0° . Postupně dojde k obrobení ploch v pořadí a), b), c). Poté je osa C^o otočena o 180° a je proveden poslední krok d).



Obrázek 5-13 - Postup obrábění zkušební obrobku [25]

Morávek ve své práci [2] dále zmiňuje další typy speciálních zkušebních obrobků, které si autoři různých prací sami navrhují a následně testují přesnost obráběcích strojů. Z toho vyplývá, že na poli zkušebních obrobků mají diagnostici velkou volnost a navržené postupy se mohou vzájemně velmi lišit.

6 Shrnutí řešeršní části

Provedená řešerše byla zaměřena zejména na oblast měření přesnosti obráběcích strojů. V úvodu práce byla stručně nastíněna problematika a představena zadávající firma Kovosvit MAS. Na tuto část navázal konstrukční popis měřeného stroje MCU 700, který byl výchozím bodem pro další zaměření teoretické části.

Důležitým faktorem v oblasti měření pětiosých obráběcích strojů jsou příslušné normy, které definují podmínky a metody pro měření geometrické přesnosti obráběcích strojů. Pro tuto práci jsou stěžejní zejména chyby rotačních os. Důležitým souborem norem je ISO 230, který definuje zásady pro zkoušky obráběcích strojů. Z tohoto souboru norem byly vybrány tři části. První důležitou částí normy je ISO 230-1, která popisuje geometrické zkoušky přesnosti strojů. Tato norma popisuje velké množství metod a způsobů měření geometrické přesnosti, a proto se na ní odkazují i jiné normy jako například ČSN ISO 10791. Část ISO 230-2 se zabývá měřením přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy u obráběcích strojů. Část ISO 230-7 je zaměřena na geometrické chyby os rotace a jejich měření. Dalším souborem norem, který stojí za zmínku v souvislosti s měřením přesnosti obráběcích strojů je ČSN ISO 10791. Ten se v mnoha případech odkazuje na normu ISO 230, ale je zaměřen přímo na testování obráběcích center. Druhá část této normy je pro měření geometrické přesnosti velmi důležitá. Popisuje metody měření a vyhodnocení jednotlivých chyb pohybových os obráběcího centra. Za zmínku dále stojí části ČSN ISO 10791-4 a ČSN ISO 10791-6. ČSN ISO 10791-4 vychází z normy ISO 230-2 a popisuje tolerance pro nastavení polohy u lineárních a rotačních os obráběcích center. ČSN ISO 10791-6 se potom zaměřuje na přesnost interpolace tří a pěti číslíkově řízených os.

Další část práce byla věnována přístupům k měření přesnosti obráběcích strojů. Autor [2] tvrdí, že lze dělit metody obecně na klasické a moderní. Konvenčním (klasickým) měřením lze většinou naměřit jen jeden parametr a pro každou chybu musí být provedeno zvláštní měření. To je velkou nevýhodou těchto typů měření a přináší s sebou velkou časovou náročnost. Na druhou stranu je hlavní výhodou jejich jednoduchost oproti moderním metodám, a proto se tyto metody často využívají. Druhou skupinou měření jsou tzv. moderní metody. Mezi ně patří metody na principu laserového

interferometru, metoda typu „chase the ball“ nebo měření Ballbarem. Tyto metody jsou většinou méně časově náročné a rychlé, protože vyhodnocují více odchylek najednou. To je jejich velkou výhodou. Mezi další výhody patří jednoduchost ustavování nebo možnost přímé kompenzace v řídicím systému na základě naměřených dat. [2]

Pro měření na stroji MCU 700 bylo na základě informací z rešeršní části práce nutné vybrat vhodnou metodu měření. Z výhod a nevýhod jednotlivých metod vyplývá, že pro komplexní určení chyby by nejvhodnější variantou byla jedna z moderních metod měření. V úvahu by připadalo měření typu „chase the ball“ nebo měření dotykovou sondou. Pro konečné určení vhodné metody měření bylo ale nutné brát v úvahu existující postupy ve firmě Kovosvit MAS a dostupnost jednotlivých zařízení nutných k provedení měření. Proto bylo nakonec přistoupeno k měření pomocí konvenčních metod měření, které k provedení zkoušky nevyžadují zařízení jako je snímací hlava nebo dotyková sonda.

7 Měření stroje MCU 700

Na základě závěrů z rešeršní části a požadavků firmy byl navržen vhodný postup měření přesnosti otočně – sklopného stolu a s tím souvisejících veličin. V další části práce budou jednotlivé kroky měření popsány a naměřená data budou v další kapitole 8 vyhodnocena. Všechna měření byla prováděna na kompletně smontovaném, plně provozuschopném a vyrovnaném stroji tak, jak definuje norma ISO 230-1 [7].

7.1 Měření přímosti os X, Y, Z

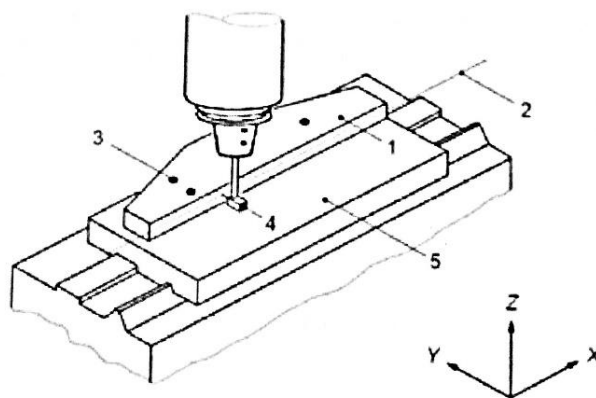
Prvním krokem při měření přesnosti stroje bylo měření přímosti pohybu lineárních os X, Y a Z. Na první pohled tyto chyby nesouvisí s přesností samotného otočně – sklopného stolu, ale znalost těchto chyb je pro vyhodnocení chyb rotačních os stroje velmi užitečná, protože tyto chyby ovlivňují další prováděná měření. Celý postup měření a vyhodnocení bude popsán na příkladu osy X. Pro osu Y a Z budou z důvodu identity postupu uvedeny jen výsledné úchytky a samotná naměřená data a vyhodnocení bude obsaženo v příloze diplomové práce. Uspořádání měření vychází z normy ČSN ISO 10791-2 [9], ve které je zobrazeno schéma měření, doporučené měřicí přístroje a tolerance pro danou měřenou délku.



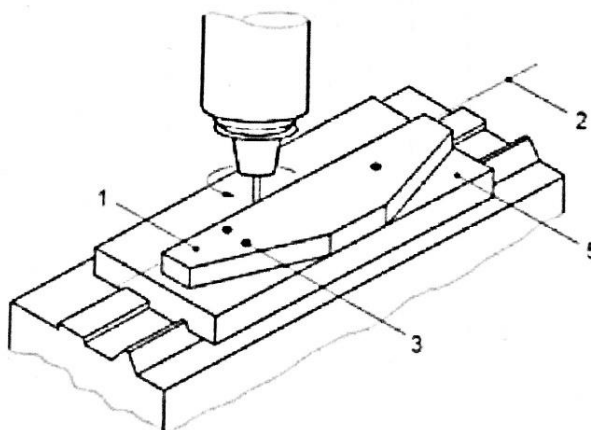
Obrázek 7-1 - Uspořádání pro měření přímosti osy X v rovině ZX

Na obrázku 7-1 je znázorněno uspořádání při prvním měření přímosti osy X v rovině ZX. Pro měření byl použit digitální úchylkoměr s magnetickým stojánkem upnutým na vřeteníku stroje. Měření bylo realizováno na pravítku na desce stolu v délce 650 mm v obou směrech pohybu. Pro tuto vzdálenost norma [9] uvádí toleranci 0,015 mm.

Druhou fází měření přímosti pohybu v ose X je měření v rovině XY. Uspořádání opět vychází z normy ČSN ISO 10791-2 [9]. Rozdílem bylo použití metody obráceného pravítka pro měření chyby přímosti, která je popsána detailněji v normě ISO 230-1 [7], viz obrázek 7-2.



a) Normální uspořádání



b) Obrácené uspořádání

Legenda

- 1 pravítko
- 2 čára měření
- 3 body podpory pravítka (3) obě strany
- 4 snímač lineárního posunutí
- 5 stůl stroje

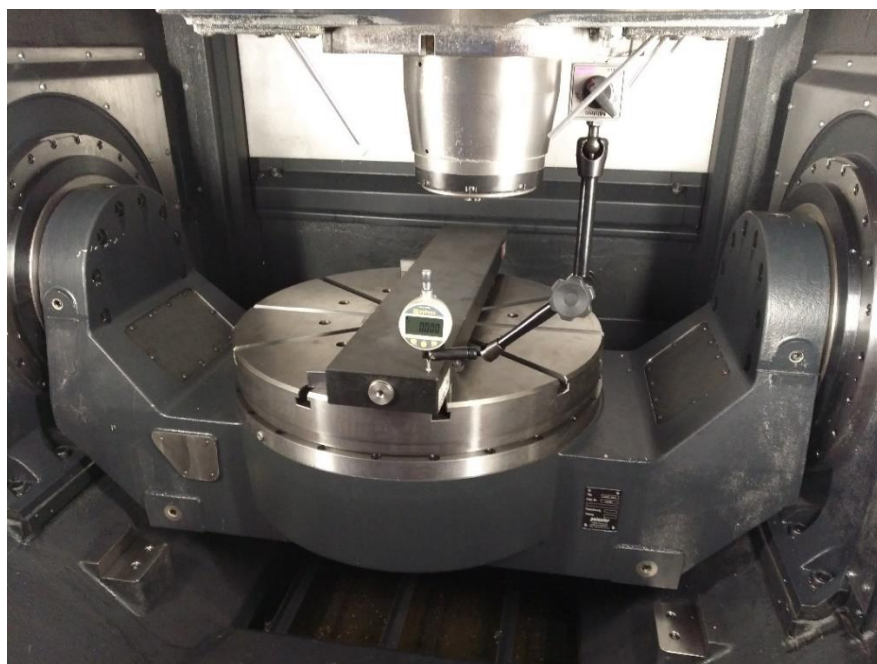
Obrázek 7-2 - Uspořádání pro měření přímosti dle normy ISO 230-1 [7]

Důvodem pro použití této metody je eliminace chyby přímosti pravítka porovnáním dvou měření při otočení pravítka. Schéma měření na stroji MCU 700 je zobrazeno na dalším obrázku 7-3. Pravítko bylo nejprve vyrovnáno poklepáváním tak, aby na počátku a na konci měřeného úseku byla úchylka nulová. Poté byla naměřena chyby přímosti pohybu mezi těmito body. Tento postup se neměnil ani pro měření v ose Y.



Obrázek 7-3 – Uspořádání pro měření přímosti osy X v rovině XY

Uspořádání pro osu Y na obrázku 7-4 je obdobné jako u měření v ose X.



Obrázek 7-4 – Uspořádání pro měření přímosti osy Y v rovině YZ

Pro měření přímosti v ose Z bylo nutné uspořádání měření změnit, protože pravítko již k tomuto měření není dostačující. Z tohoto důvodu bylo nutné použít rámový úhelník o rozměru 400x400 mm. Z důvodu rozměrů použitého úhelníku byla měřená dráha upravena na 360 mm. S tím souvisí i dovolená úchylka dle normy ČSN ISO 10791-2 [9], která činí v tomto případě 0,010 mm.

Na dalším obrázku 7-5 je zobrazeno uspořádání pro měření přímosti pohybu v ose Z pro rovinu YZ. Obdobně vypadalo měření v rovině ZX.



Obrázek 7-5 - Uspořádání pro měření přímosti osy Z v rovině YZ

7.2 Měření kolmosti os X, Y, Z

Další fází měření geometrické přesnosti stroje bylo měření vzájemných kolmostí jednotlivých lineárních os. Stejně jako měření přímosti přímo nesouvisí s přesností otočně – sklopného stolu, ale poskytuje důležitou informaci o přesnosti pohybu lineárních os, které přímo ovlivňují výslednou přesnost při obrábění.

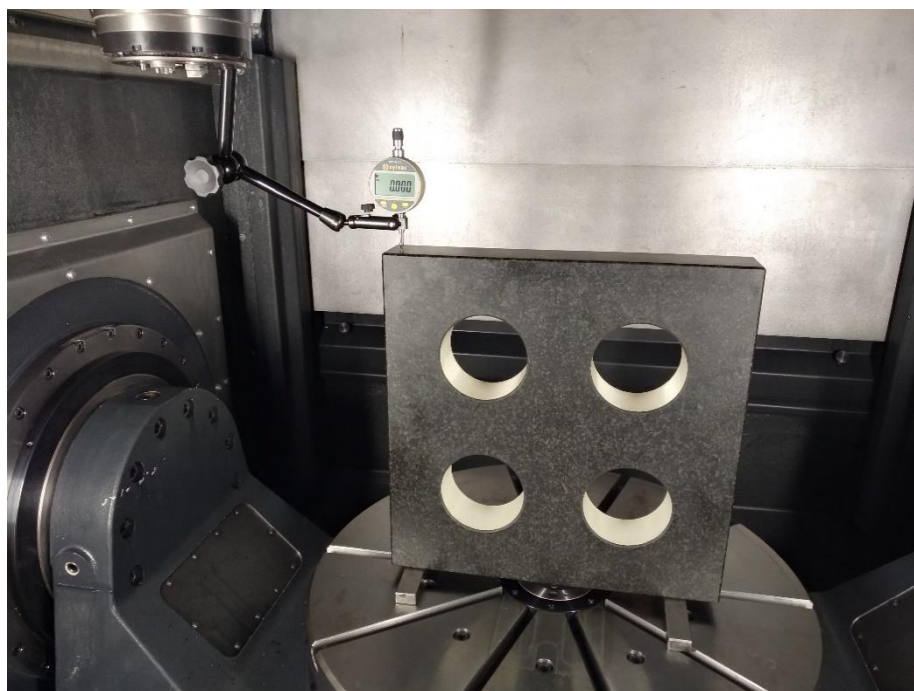
Na obrázku 7-6 je zobrazeno uspořádání pro měření kolmosti pohybů pohybových os X a Y. K měření byl použit granitový rámový úhelník a úchylkoměr s rozlišením 0,001 mm. Nejprve byl rámový úhelník vyrovnán rovnoběžně s pohybem v ose X pomocí postupného

poklepávání na základě údajů z úchylkoměru. Poté byl úchylkoměr přestaven pro měření v ose Y. Jelikož byla jedna strana úhelníku vyrovnána rovnoběžně s osou X, naměřená hodnota v ose Y je přímo chyba kolmosti osy X a Y.



Obrázek 7-6 - Uspořádání pro měření kolmosti os X a Y

Pro měření kolmosti pohybů v ose X a Z bylo použito opět měření pomocí rámového úhelníku (obrázek 7-7).



Obrázek 7-7 - Uspořádání pro měření kolmosti os X a Z

Při tomto měření byl rámový úhelník opět poklepáním vyrovnán rovnoběžně s osou X. Poté byla naměřena úchylka pohybu v ose X a následně i v ose Z. Stejný postup byl aplikován i na měření kolmosti pohybů os Y a Z.

7.3 Měření kinematiky

Zkoušky uvedené v předchozích dvou kapitolách dávají informaci o geometrické přesnosti stroje a chybách lineárních os. Při reálném provozu stroje je však velmi důležitá součinnost všech pěti os obráběcího stroje. Proto je nutné provést na stroji zkoušku kinematiky.

Při zkoušce kinematiky jsou pohyby stroje naprogramovány tak, že vřeteno stroje sleduje svým pohybem referenční koule na otočně – sklopném stole, který polohuje do předem naprogramovaných pozic. V těchto pozicích je pomocí snímačů nebo úchylkoměrů připevněných ve vřeteni odečtena odchylka nulového bodu nástroje od referenční koule. V případě měření v této diplomové práci bylo z důvodu dostupnosti zvoleno měření pomocí úchylkoměrů připevněných v držáku v nástrojové dutině vřetena. V kapitole 5 byly popsány další způsoby, kterými je možné tuto chybu určit. Za zmínku stojí měření pomocí dotykové sondy a opce KinematicsOpt, která je v některých případech také ve firmě Kovosvit MAS používána.

Na obrázku 7-8 je zobrazena konfigurace pro měření kinematiky v pracovním prostoru stroje MCU 700. Do vřetena je upnut držák s úchylkoměrem a na stole je upnuta referenční koule. Držák má otvory ve třech směrech souřadného systému X, Y, Z tak, aby bylo možné odečítat naměřené úchylky v těchto směrech a dále je vyhodnocovat. Při interpolaci osy C je zaznamenávána úchylka v osách X a Y. Při interpolaci v ose A jsou poté vyhodnocovány úchylky v osách Y a Z. Před samotným měřením je nutné v řídicím systému přenastavit nulový bod nástroje do středu referenční koule.



Obrázek 7-8 - Konfigurace pro měření kinematiky

Na obrázku 7-9 je zobrazeno měření v poloze $A=-90^\circ$.



Obrázek 7-9 - Měření interpolace během polohování v ose A

7.4 Měření chyby osy A

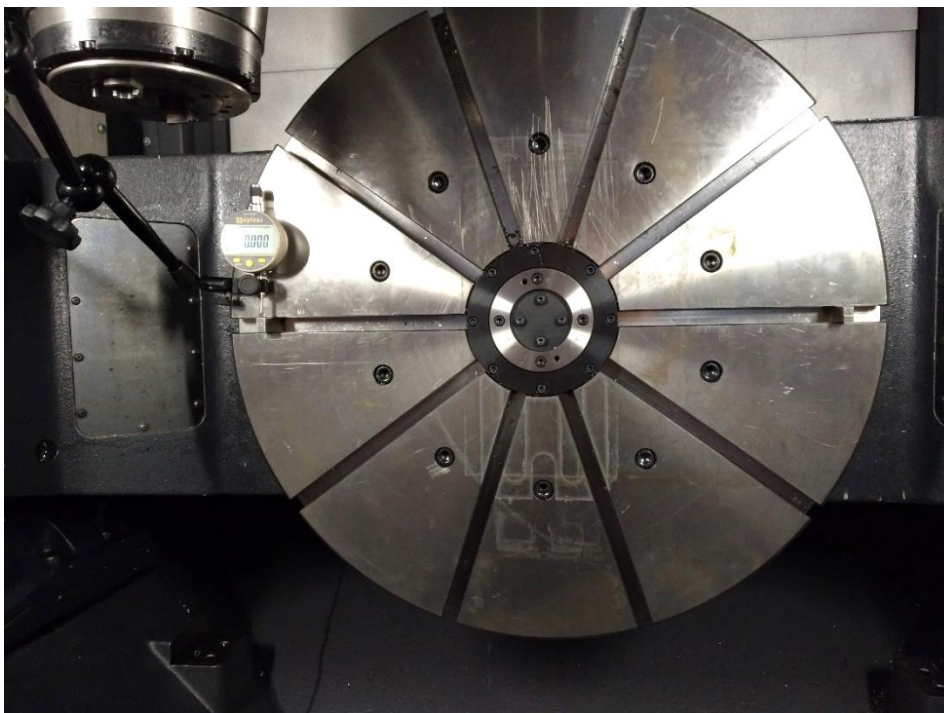
Dalším z faktorů, které ovlivňují výslednou přesnost stroje je chyba osy A. Ta je zapříčiněna samotným ustavením kolébky v pracovním prostoru stroje. Vedle výsledné přesnosti obrábění ovlivňuje tato chyba i měření kinematiky. Proto je nutné brát chybu osy A v potaz při kritickém zhodnocení naměřených hodnot. Jedním z požadavků firmy Kovosvit MAS při řešení této práce bylo tedy určení přesnosti ustavení otočně – sklopného stolu, které následně ovlivňuje přesnost měření kinematiky.

Pro změření chyby osy A byl stanoven postup s pomocí jednoduchých pomůcek – digitálního úchylkoměru a přesných koncových měrek. Na obrázku 7-10 je zobrazeno uspořádání pro toto měření.



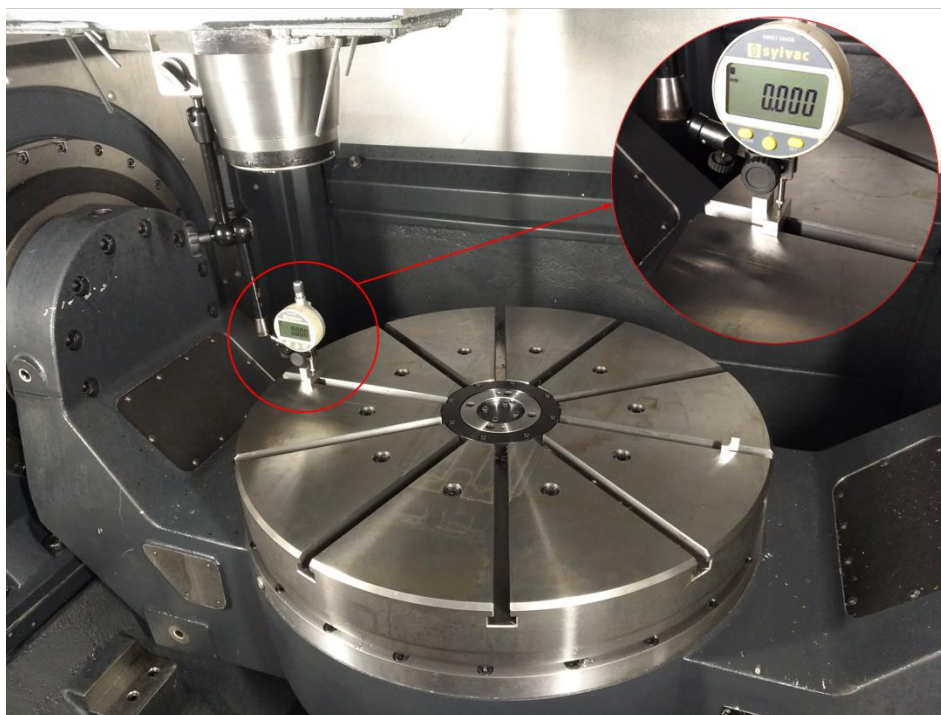
Obrázek 7-10 - Uspořádání pro měření chyby osy A

Principem měření je určení výchylky mezi dvěma měřenými body. V tomto případě jsou tyto body reprezentovány dvěma koncovými měrkami zasazenými do drážky stolu. Po změření výchylky byly osa A napolohována do pozice $A = -90^\circ$ a opět odečtena výchylka mezi dvěma koncovými měrkami. Toto měření je zobrazeno na dalším obrázku 7-11.



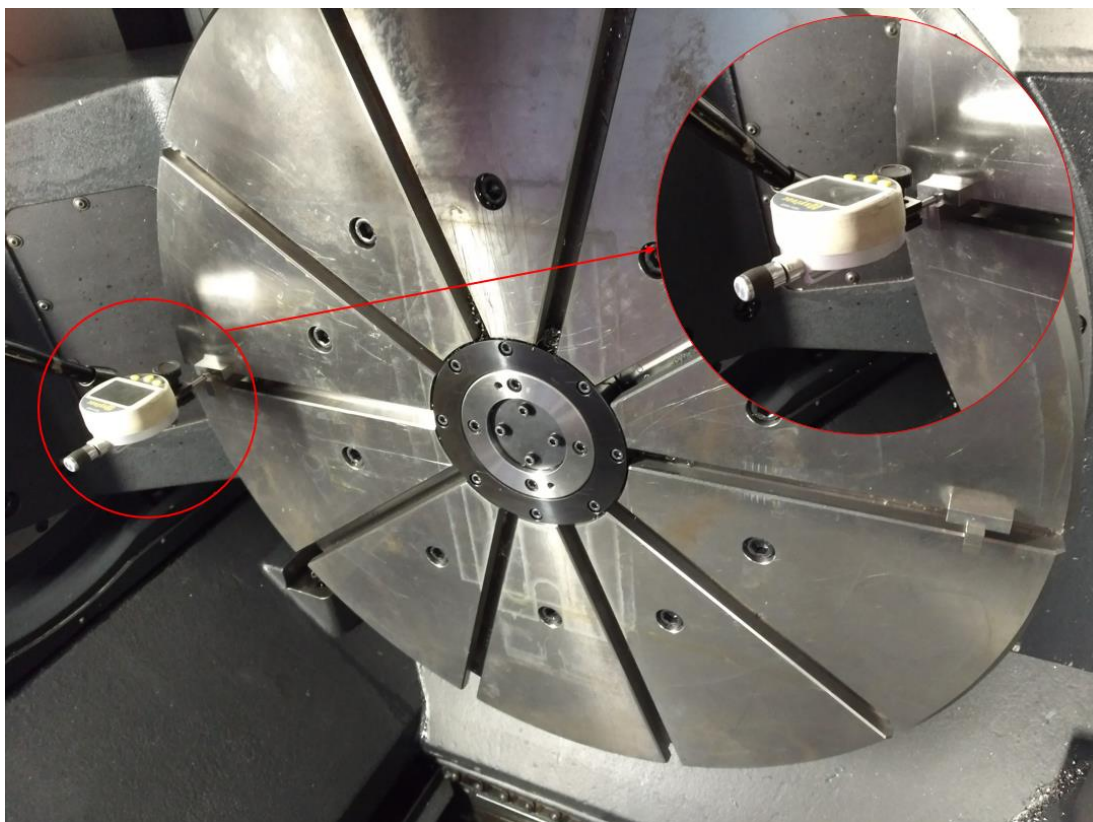
Obrázek 7-11 - Měření chyby osy A v poloze $A=-90^\circ$

Tímto měřením byla zjištěna výchylna a její změna ve směru rovnoběžném k ploše stolu. Pro zjištění výchylny v kolmém směru bylo provedeno další měření, tentokrát s koncovými měrkami na ploše stolu. Na dalším obrázku 7-12 je zobrazeno uspořádání pro toto měření.



Obrázek 7-12 - Měření chyby osy A s detailním pohledem na koncové měrky

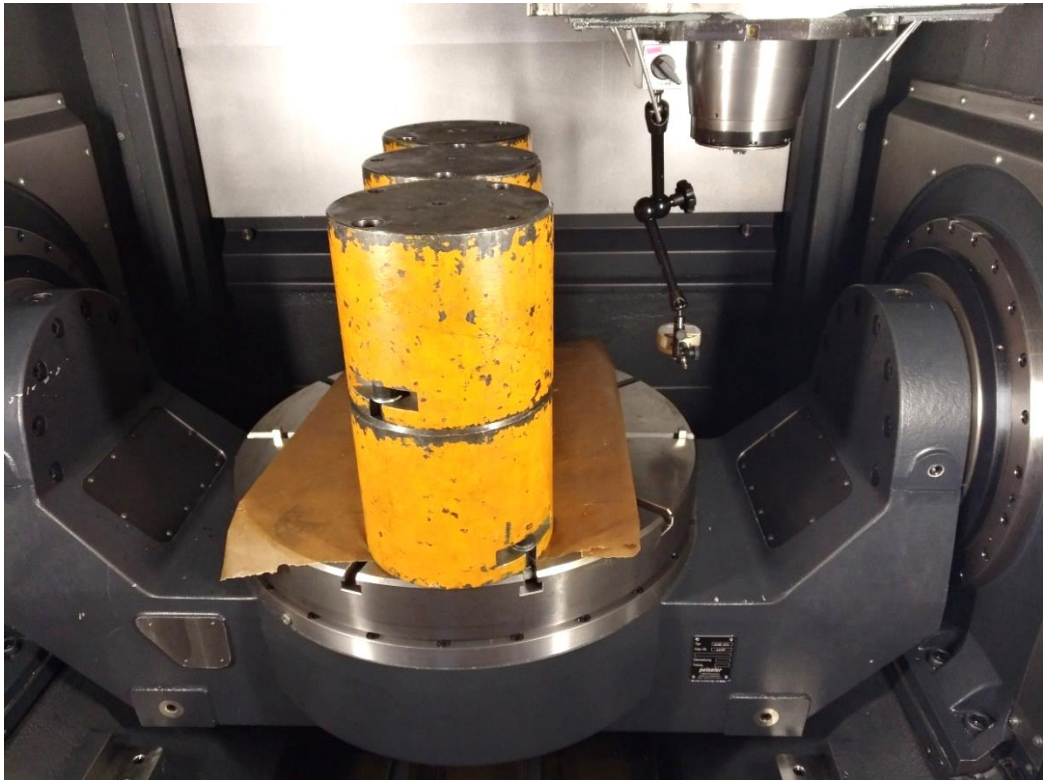
Stejným způsobem byla osa opět napolohována do pozice $A=-90^\circ$, viz obrázek 7-13.



Obrázek 7-13 - Měření chyby osy A v poloze $A=-90^\circ$

Z celé série měření tedy byly zjištěny 4 naměřené hodnoty chyby osy A. Celá série měření byla stejným způsobem změřena s osou C otočenou o 180° . Pro porovnání vlivu zpevnění osy A na výslednou chybu bylo dále vypnuto zpevnění v řídicím systému a všechna již provedená měření byla provedena znovu. Vyhodnocení vlivu zpevnění osy je taktéž uvedeno v kapitole 8.5.

Dalším předmětem zkoumání a jedním z požadavků firmy Kovosvit MAS byl vliv zátěže na celkovou chybu osy A. Proto bylo celé měření zopakováno se zátěží upnutou na desce stolu. Jako zátěž byla v tomto případě uvažována soustava šesti závaží o hmotnosti 50 kg. Celkové zatížení otočně – sklopného stolu bylo tedy 300 kg. Na dalším obrázku 7-14 je zobrazeno uspořádání jednotlivých závaží pro měření chyby osy A. Měření se zátěží probíhalo při vypnutém zpevnění osy A v řídicím systému.

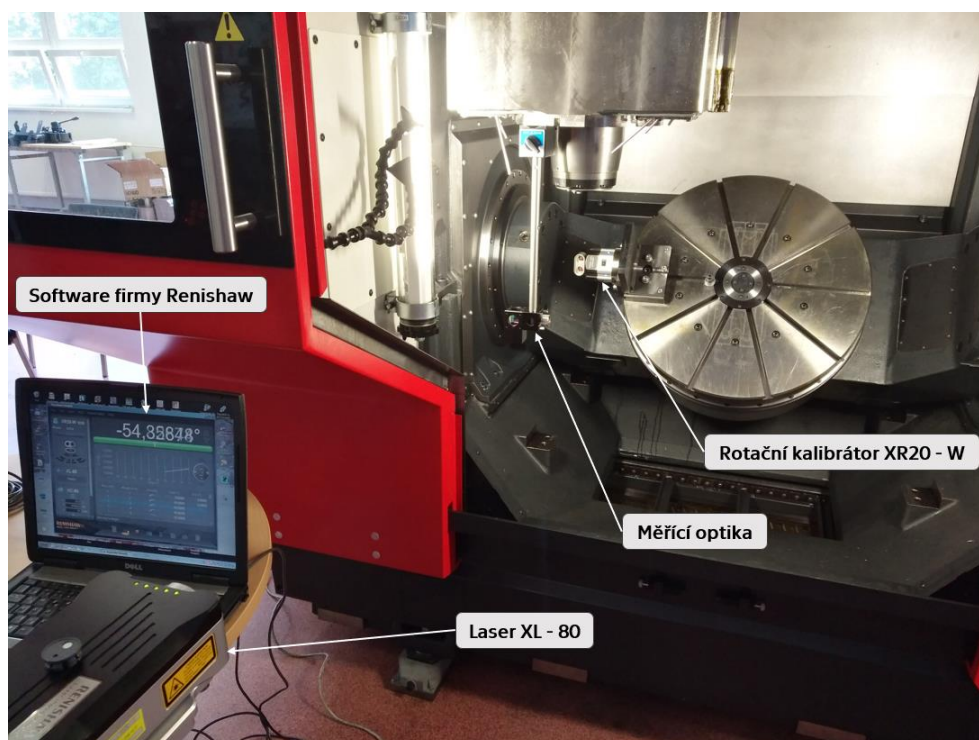


Obrázek 7-14 - Zatížený otočně - sklopný stůl

Další postup měření byl shodný s měřením bez závaží. Postupně byly pomocí úchylkoměru zaznamenávány výchylky do jednotlivých směrů souřadného systému stroje. Menší komplikaci představovala překážka v podobě závaží. Tato komplikace vyžadovala větší pozornost a opatrnost při přejezdech mezi měřenými body.

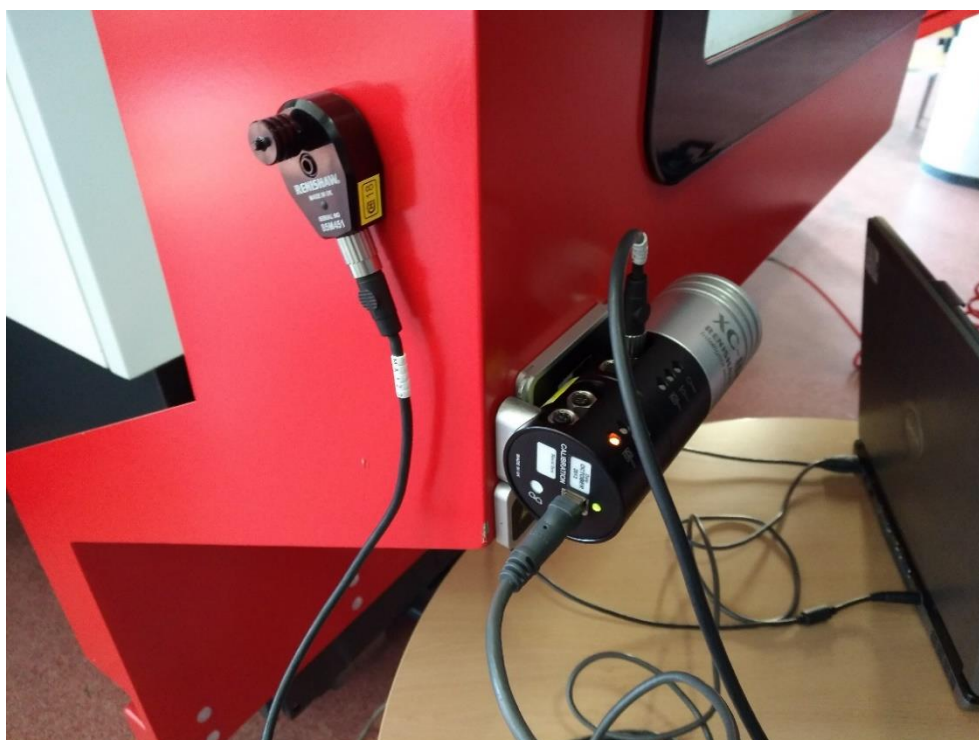
7.5 Polohování rotační osy A

Závěrečným měřením, které bylo v rámci této práce na stroji MCU 700 provedeno, bylo určení přesnosti polohování osy A dle normy ISO 230-2. Pro měření byla použita souprava pro měření přesnosti polohování od firmy Renishaw, která je zobrazena a popsána na obrázku 7-15. Na otočně – sklopném stole je připevněn do drážky přípravek s rotační kalibrátorem XR20 – W, který nese koutový odražeč a zajišťuje jeho polohování. Na vřeteníku je pomocí magnetického stojánku připevněna měřicí optika. Skrze optiku je na koutový odražeč namířen laserový paprsek z laseru XL – 80. Po úvodní kalibraci byl spuštěn program v řídicím systému stroje, který polohoval otočně sklopný stůl. Rotační kalibrátor na základě aktuální polohy otáčel koutovým odražečem a pomocí odměřování zaznamenával svoji polohu. Tato poloha byla pomocí Bluetooth přenášena do notebooku, ve kterém byl nainstalován software firmy Renishaw.



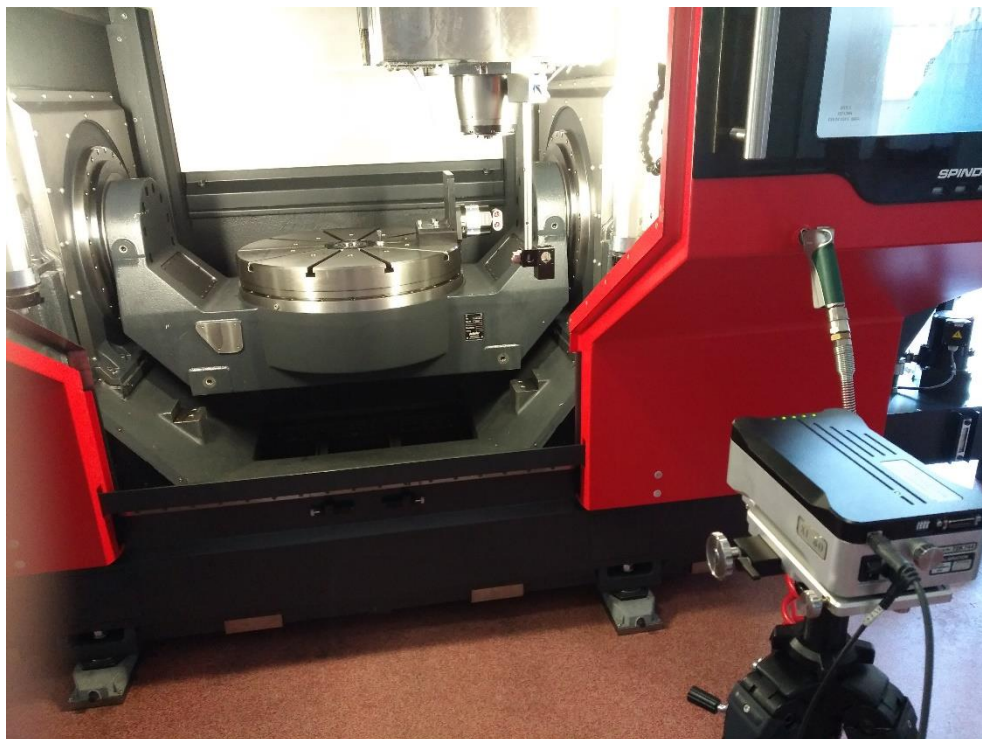
Obrázek 7-15 - Popis uspořádání pro měření přesnosti polohování osy A

Součástí aparatury je i kompenzátor XC – 80 se snímači, které slouží k určení teploty vzduchu, tlaku vzduchu a relativní vlhkosti. Na základě těchto hodnot je provedena kompenzace vlnové délky laseru. Kompenzátor je zobrazen na dalším obrázku 7-16.



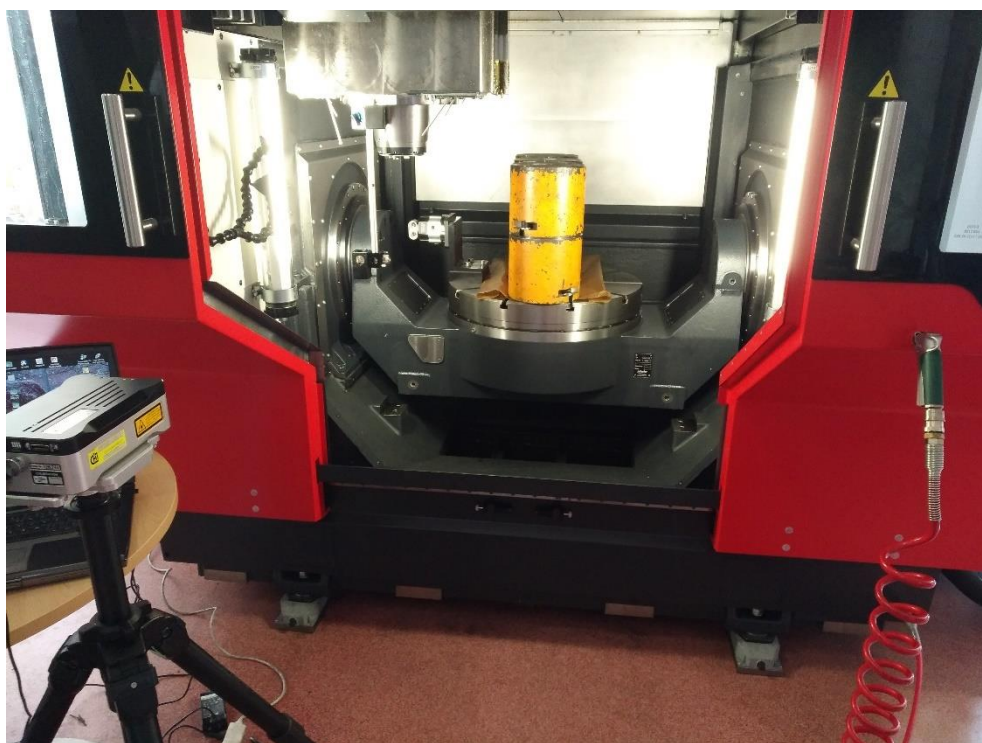
Obrázek 7-16 - Kompenzátor XC - 80 se snímači

Pro další porovnání byl rotační kalibrátor upevněn i na druhou stranu otočné stolu (obrázek 7-17).



Obrázek 7-17 - Měření přesnosti polohování osy A v druhé rovině

V závěrečném měření byla měřena přesnost polohování se zátěží na stole (obrázek 7-18).



Obrázek 7-18 - Měření přesnosti polohování osy A se zatíženým stolem

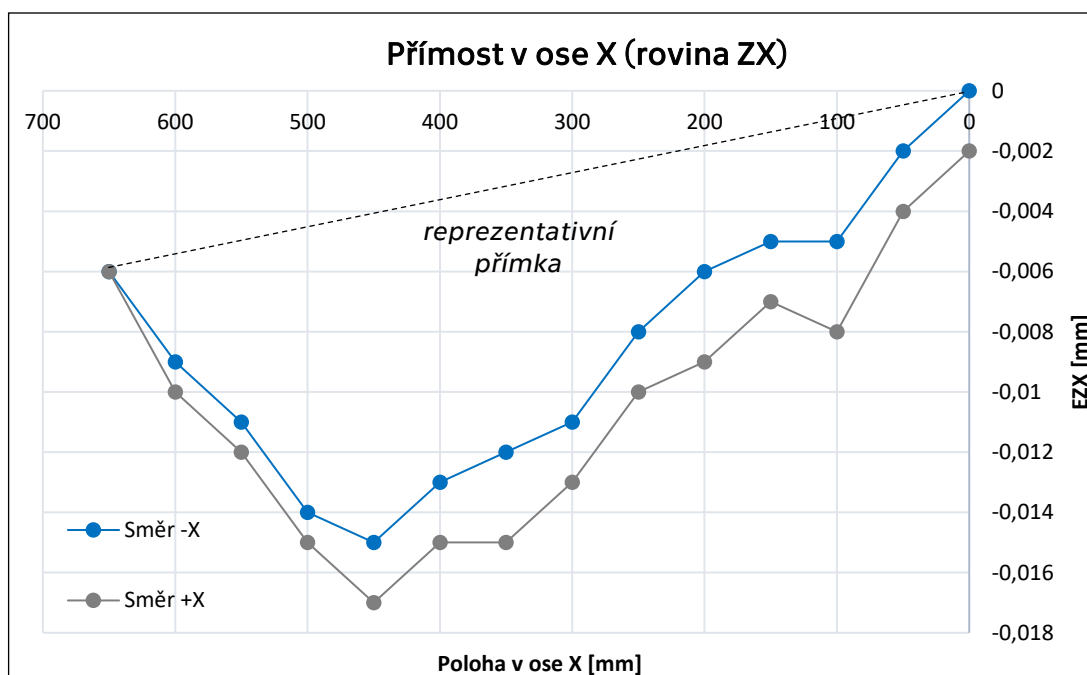
8 Vyhodnocení naměřených dat

V další části práce bude popsán postup vyhodnocení naměřených dat, která byla naměřena zkouškami popsány v kapitole 7.

8.1 Vyhodnocení přímosti v ose X, Y, Z

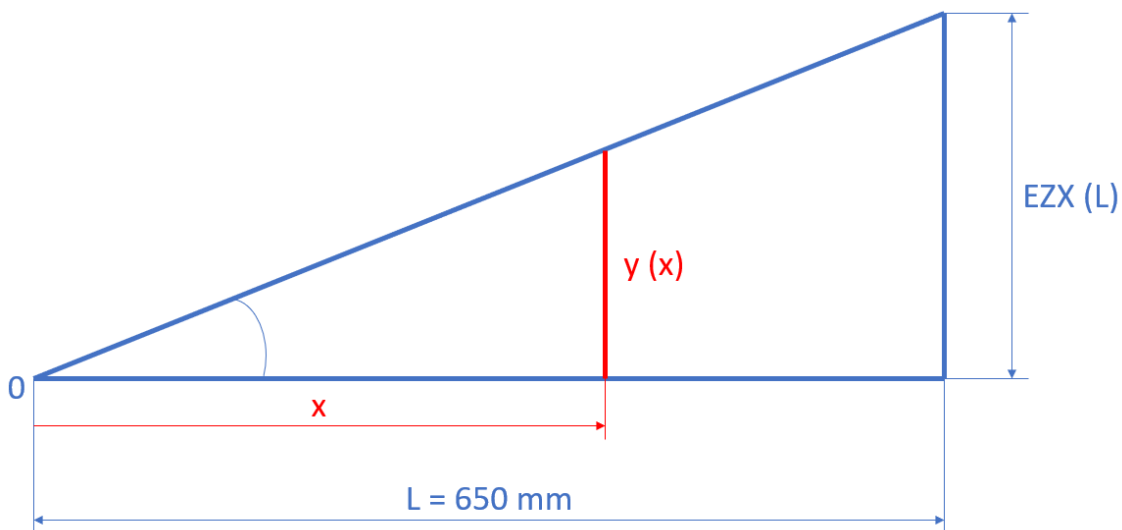
Stejně jako v kapitole 7.1 bude i zde celý postup vyhodnocení naměřených dat popsán na příkladu osy X. Pro zbývající osy Y a Z budou vyhodnocená data uvedena v příloze.

Následující graf na obrázku 8-1 znázorňuje naměřenou chybu EZX v závislosti na poloze v ose X v kladném i záporném smyslu pohybu. Oproti reálným odečteným hodnotám z úchylkoměru (viz uspořádání na obrázku 8-1) byly hodnoty uvažovány se zápornou hodnotou tak, aby kladná výchylka EZX směřovala do směru +Z v souřadném systému stroje.



Obrázek 8-1 - Graf naměřených hodnot v ose X

Z grafu je patrný rozdíl v hodnotách na svislé ose mezi první a poslední naměřenou hodnotou. To značí celkový sklon reprezentativní přímky. To může být zapříčiněno sklonem stolu, na kterém bylo pravítko uloženo. Pro získání samotné přímosti pohybu v ose X byl tedy použit jednoduchý výpočet, pomocí kterého je eliminován vliv sklonu reprezentativní přímky. Princip výpočtu je znázorněn na dalším obrázku 8-2.

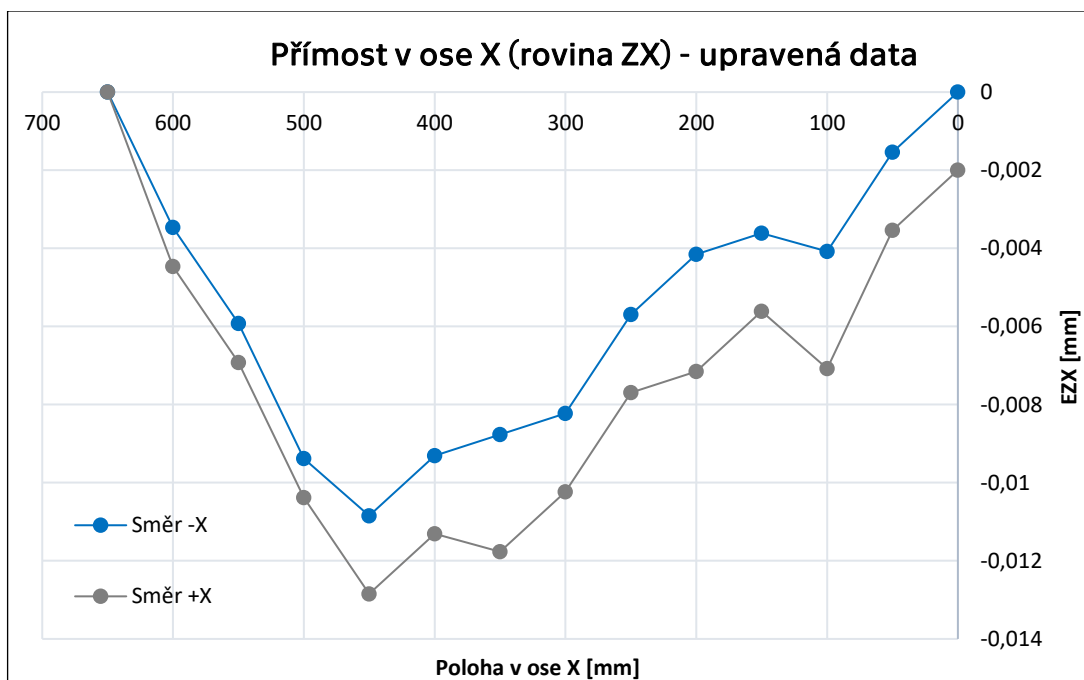


Obrázek 8-2 - Schéma pro výpočet úchylky přímosti

Ze schématu vyplývá výpočet upravených hodnot úchylky EZX:

$$EZX(x) = EZX(L) \cdot \frac{x}{L} - y(x) \quad (8.1)$$

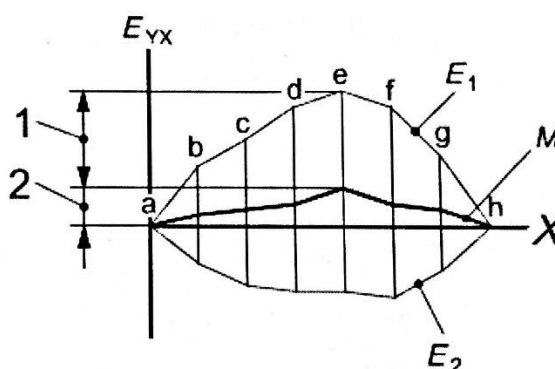
Z tohoto výpočtu byl opět vytvořen graf přepočítané úchylky EZX v závislosti na poloze v ose X. Tento graf je zobrazen na obrázku 8-3.



Obrázek 8-3 - Upravená data chyby přímosti v ose X

Tento graf již zobrazuje samotnou úchylku přímosti v ose X na měřeném úseku. Maximální hodnota chyby přímosti pohybu v ose X dosahuje **-0,013 mm**.

Druhým krokem měření přímosti v ose X bylo měření chyby E_{YX} v rovině XY. Princip měření metodou obráceného pravítka byl popsán v kapitole 7.1. Na dalším obrázku 8-4 je znázorněno schéma výpočtu podle normy ISO 230-1 [7].



Legenda

- X poloha na ose X
- E_{YX} úchylka přímosti X ve směru osy Y
- 1 chyba přímosti X ve směru osy Y [$S(X)_{max}$]
- 2 chyba přímosti pravítka
- a až h pozice měření
- E_1 průběh odečtu pro normální nastavení
- E_2 průběh odečtu pro obrácené nastavení
- M průměr E_1 a E_2

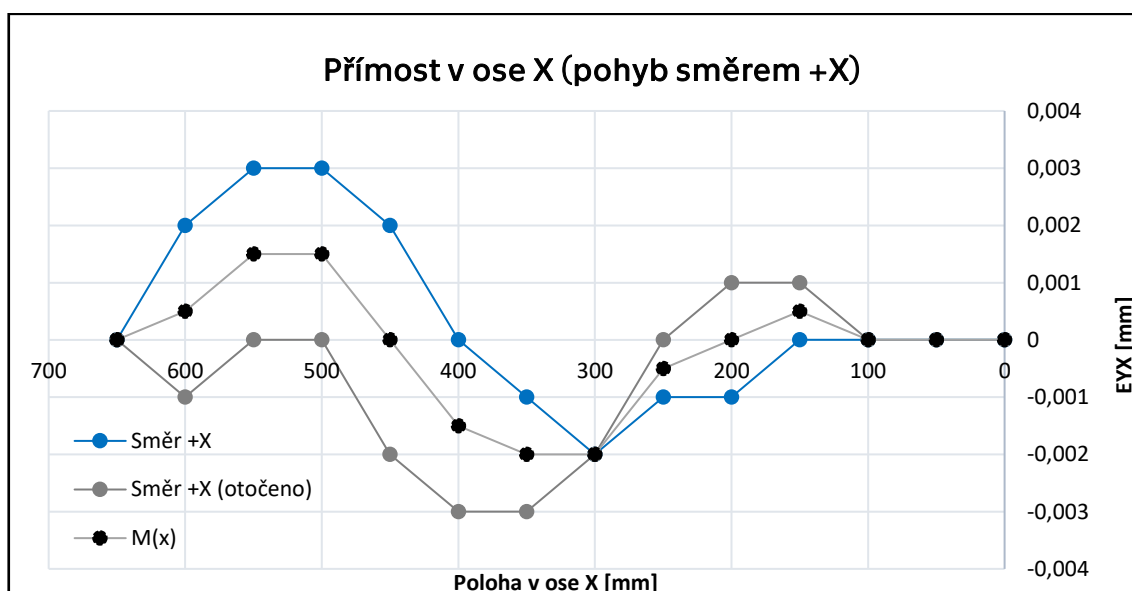
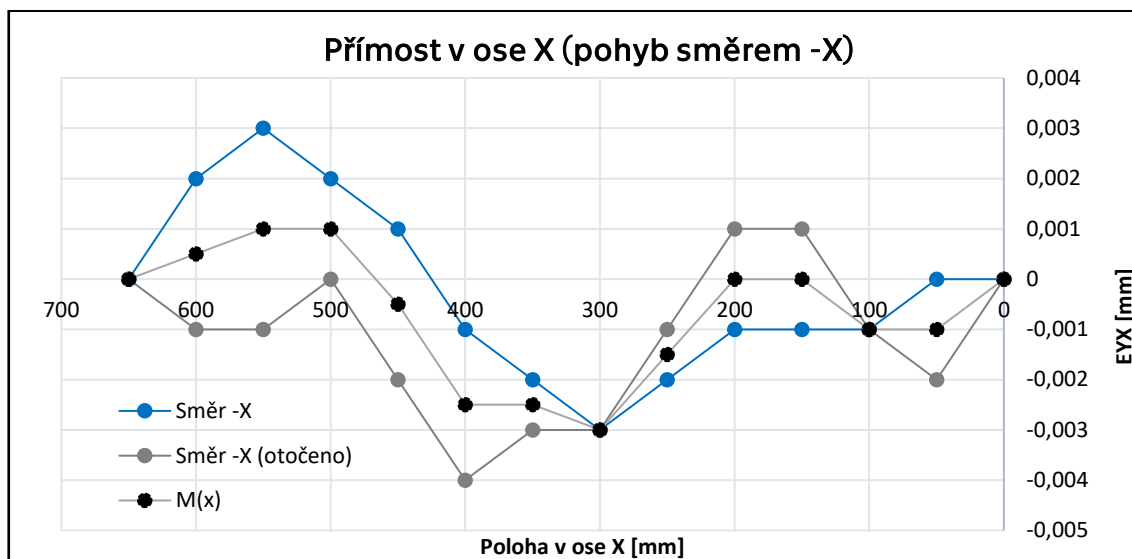
Obrázek 8-4 - Princip vyhodnocení metody obráceného pravítka [7]

V první fázi se proměří chyba přímosti pro normální nastavení, viz křivka E_1 na obrázku 8-4. Pro správné vyhodnocení je nutné, aby bylo pravítko v bodech a) a h) vyrovnané do nulové výchylky. Po odečtení hodnot se pravítko otočí dle schématu na obrázku 7-2 kolem své podélné osy, opět vyrovná do nulové výchylky a jsou zaznamenány hodnoty chyby přímosti pro obrácené nastavení.

Výsledná úchylka přímosti referenčního povrchu pravítka se dle ISO 230-1 [7] určí dle vztahu:

$$M_p(x) = \frac{E_1(x) + E_2(x)}{2} \quad (8.2)$$

Na obrázku 8-5 jsou vyhodnocena naměřená data pro smysl pohybu směrem +X a -X.



Obrázek 8-5 - Vyhodnocení chyby přímosti metodou obráceného pravítka

Provedením měření pro oba směry pohybu byla ověřena správnost měření, jelikož křivky při obou měření jsou až na malé odchylky totožné. Maximální chyba přímosti po odečtení chyby přímosti referenčního povrchu pravítka činí **0,002 mm**.

Vyhodnocení naměřených dat osy Y a Z bude uvedeno v příloze diplomové práce, v následující tabulce 8-1 jsou uvedeny pouze výsledné úchytky z naměřených dat os X, Y, Z:

Výsledné hodnoty chyby přímosti jednotlivých os	
Přímost v ose X	
EZX [mm]	0,013
EYX [mm]	0,002
Přímost v ose Y	
EZY [mm]	0,005
EXY [mm]	0,003
Přímost v ose Z	
EYZ [mm]	0,004
EXZ [mm]	0,004

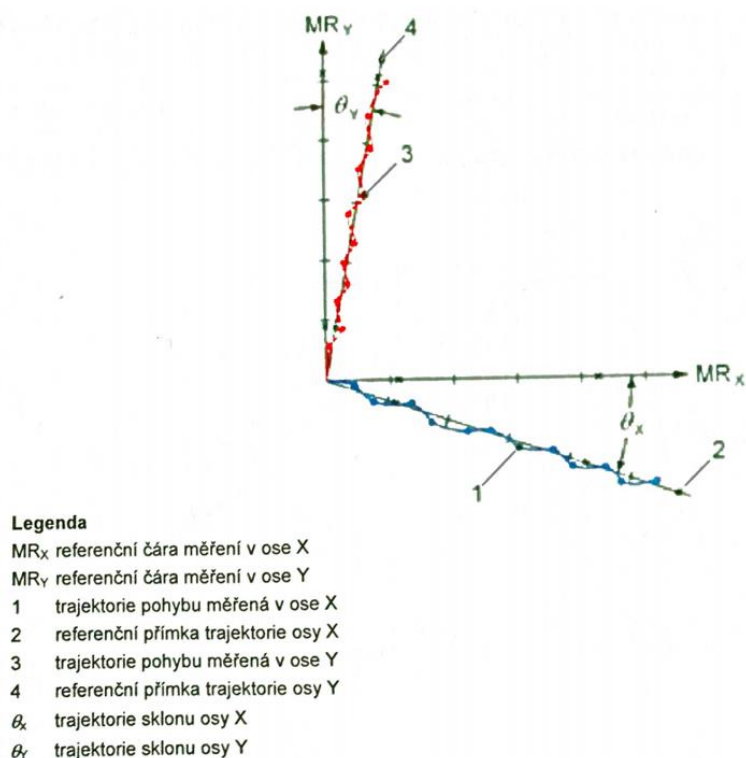
Tabulka 8-1 - Výsledné hodnoty chyby přímosti jednotlivých os

Zeleně podbarvené hodnoty chyby přímosti splňují toleranci dle ČSN ISO 10791-2. Pro osy X a Y tato tolerance činí 0,015 mm a pro osu Z 0,010 mm. Příčinou rozdílu tolerancí je menší měřená délka v ose Z.

8.2 Vyhodnocení vzájemné kolmosti os X, Y, Z

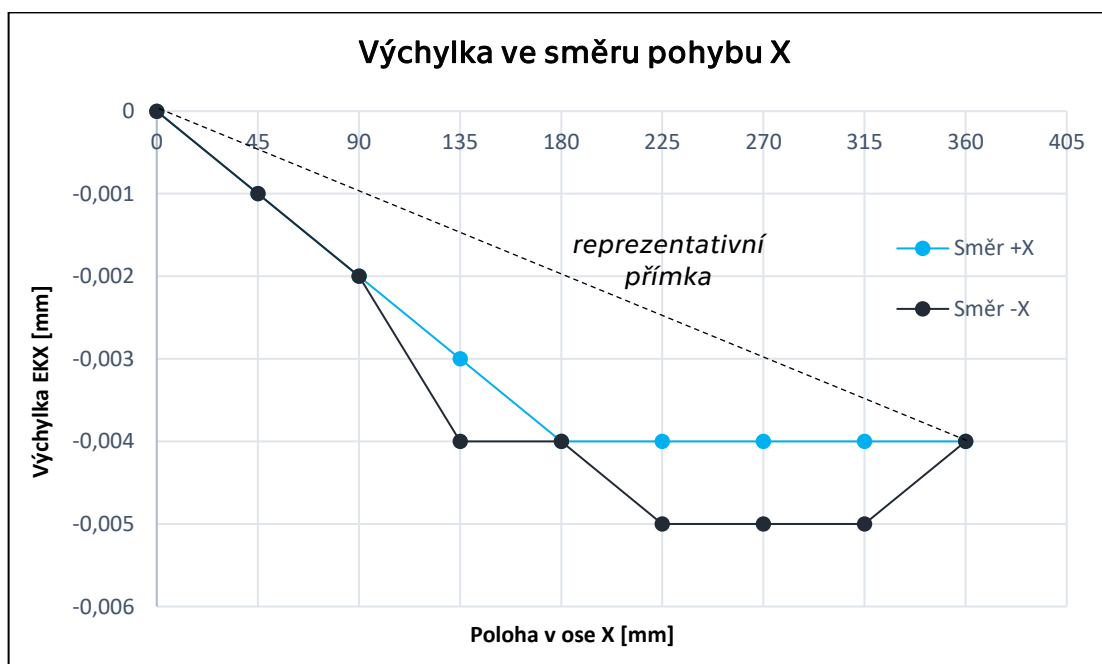
Postup vyhodnocení naměřených dat chyby kolmosti os X, Y, Z bude demonstrován na příkladu chyby kolmosti pohybu os X a Z. Stejným postupem byly získány výsledné hodnoty chyby kolmosti pohybu os Y a Z. Chyba kolmosti os X a Y vyplývá přímo z naměřených dat a není nutné hodnoty dále upravovat a vyhodnocovat. V závěru kapitoly budou pro porovnání opět hodnoty výsledné chyby uvedeny v tabulce 8-2.

Přístup k vyhodnocení naměřených dat je naznačen na obrázku 8-6. Chyba kolmosti je určena pomocí dvou reprezentativních přímek měřených os. Ty jsou vytvořeny spojením první a poslední naměřené hodnoty v příslušné měřené ose. Další možností pro vytvoření reprezentativní přímkou dle normy ISO 230-1 [7] je použití metody nejmenších čtverců. Tímto postupem vzniknou dvě referenční přímkou os, které mají určitou úhlovou chybu oproti referenční čáře. Porovnáním těchto dvou úhlových chyb referenčních přímek dostaneme konečnou chybu kolmosti pohybu dvou pohybových os.

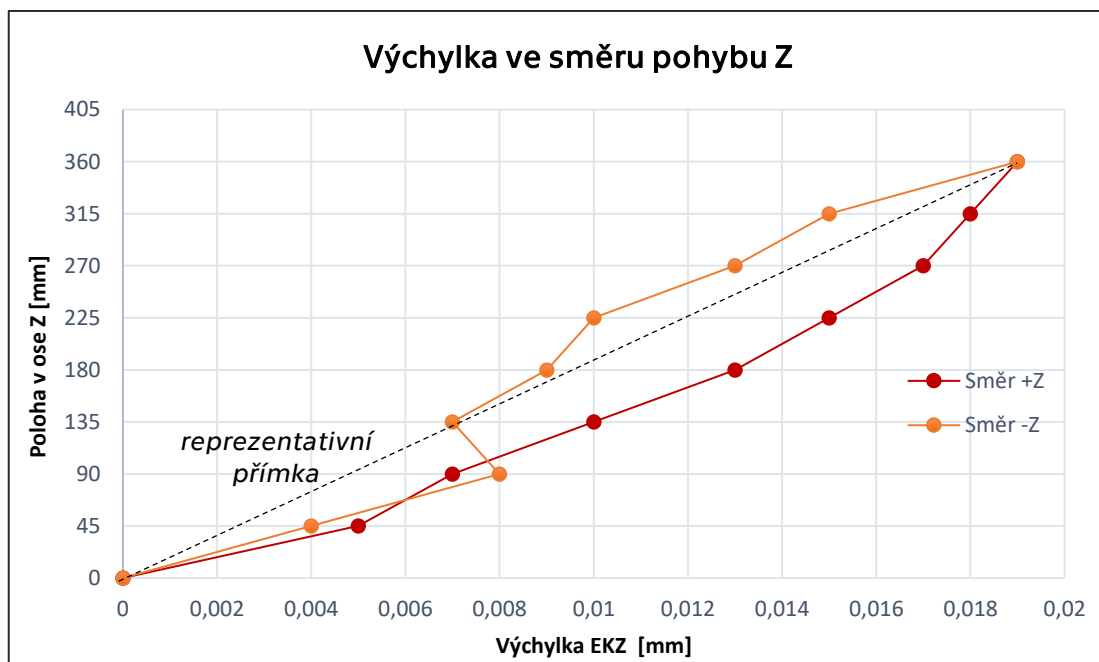


Obrázek 8-6 - Vyhodnocení dat chyby kolmosti dvou os [7]

Na dalším obrázku 8-7 a 8-8 jsou již uvedeny grafy naměřených hodnot v jednotlivých osách. Hodnoty v ose X bylo nutno přenásobit záporným znaménkem tak, aby kladná výchylka směřovala do kladného smyslu osy Z v souřadném systému stroje.

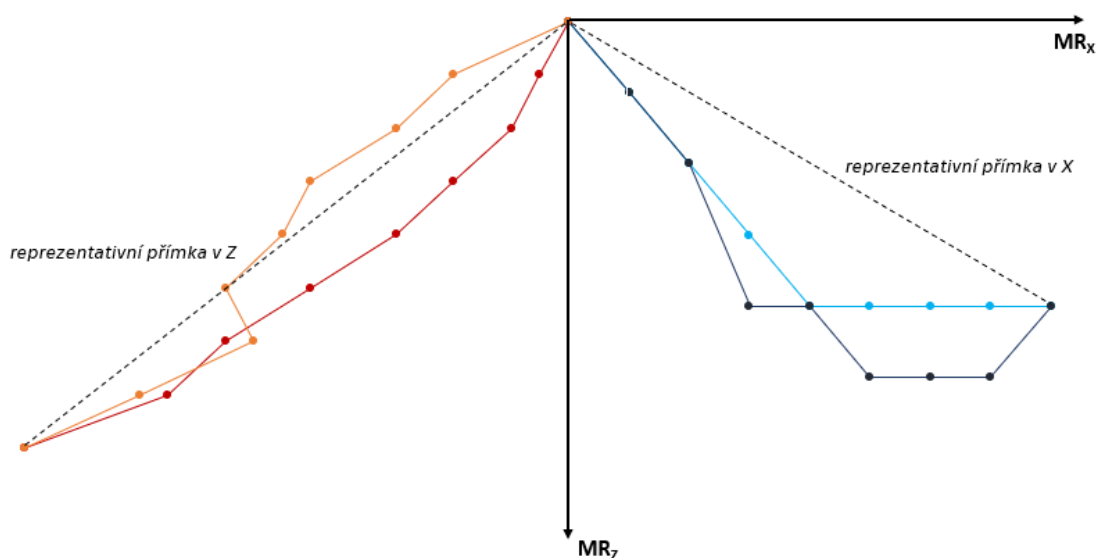


Obrázek 8-7 - Naměřená výchylka v ose X



Obrázek 8-8 - Naměřená výchylka v ose Z

Pro vyhodnocení dat podle normy ISO 230-1 (viz obrázek 8-6) bylo nutné porovnat tato data vůči sobě a určitě jejich odchylku od referenčních čar měření MR_x a MR_z . Dle obrázku 8-7 činí výchylka reprezentativní přímky v X -0,004 mm. Dle obrázku 8-8 byla určena výchylka reprezentativní přímky v Z jako -0,019 mm. Obrácení znaménka je zapříčiněno obrácením pořadí hodnot z důvodu správného navázání na naměřená data osy X.



Obrázek 8-9 - Vyhodnocení chyby kolmosti os X a Z

Výsledná chyba kolmosti se určí jako rozdíl odchylek reprezentativních průmek od svých referenčních os dle rovnice 8.3. Výsledná chyba kolmosti bude uvažována v absolutní hodnotě.

$$EKXZ = |EKZ - EKX| \quad (8.3)$$

$$EKXZ = |-0,019 - (-0,004)| = \mathbf{0,015 \text{ mm}} \quad (8.4)$$

Výsledná chyba kolmosti pohybu os X a Z tedy činí **0,015 mm**. Tolerance dle normy ČSN ISO 10791-2 je definována jako 0,020 mm na měřené délce 500 mm. Při měření kolmosti ve firmě Kovosvit MAS byl bohužel k dispozici jen úhelník 400x400 mm a měření bylo provedeno na délce 360 mm. Při přepočtu na tuto délku vychází tolerance 0,0144 mm.

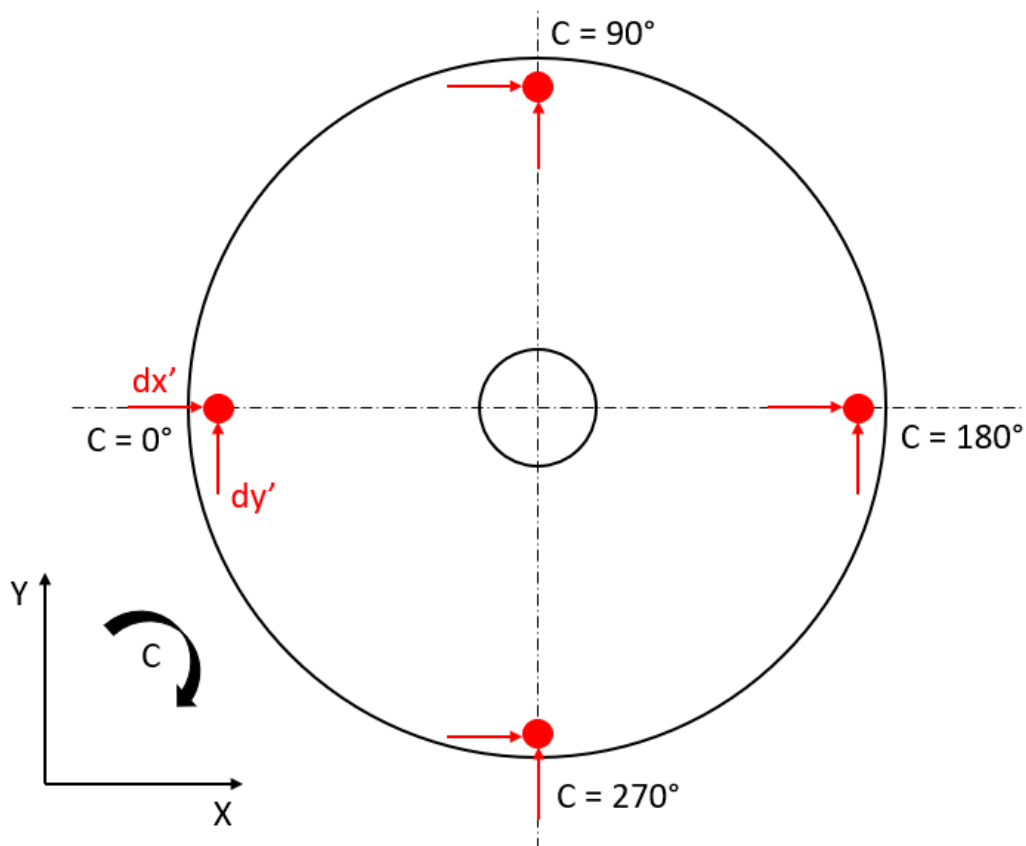
Výsledné hodnoty chyby kolmosti pohybu os	
Kolmost pohybů v ose X a Y	
EKXY [mm]	0,003 / 360 mm
Kolmost pohybů v ose Z a X	
EKXZ [mm]	0,015 / 360 mm
Kolmost pohybů v ose Z a Y	
EKYZ [mm]	0,001 / 360 mm

Tabulka 8-2 - Výsledné chyby kolmosti pohybů jednotlivých os

V tabulce 8-2 jsou uvedeny výsledné hodnoty chyby kolmosti vztažené na délku měřeného úseku. Chyby kolmosti EKXY a EKYZ splňují toleranci. Chyba kolmosti pohybu osy X a Z upravenou hodnotu tolerance již lehce překročila.

8.3 Vyhodnocení měření kinematiky

Důležitým měřením pro stanovení výsledné přesnosti otočně – sklopného stolu a lineárních pohybových os je měření kinematiky. Uspořádání pro toto měření bylo popsáno v kapitole 7.3. V první fázi měření bylo provedeno měření interpolace během polohování osy C a lineárních os X a Y. Na dalším obrázku 8-10 je zobrazeno schéma měřených poloh pro toto měření. Červeně jsou znázorněny jednotlivé polohy referenční koule a šipky naznačují polohu úchylkoměru. Postupně byly projety 4 polohy osy C po 90° a odečteny úchylky dx' a dy' .



Obrázek 8-10 - Schéma měření při interpolaci osy C

V další tabulce 8-3 jsou uvedeny naměřené výchylky v jednotlivých polohách.

Měření při $A = 0^\circ$ - INTERPOLACE XY		
Poloha osy C [°]	dx' [mm]	dy' [mm]
0	-0,001	0,001
90	0,004	0,02
180	0,018	0,011
270	0,011	-0,002

Tabulka 8-3 - Naměřené hodnoty interpolace v rovině XY

Vyhodnocení těchto naměřených hodnot se provádí pomocí aritmetického průměru naměřených hodnot v zeleně zvýrazněných polích v tabulce 8-3. Pro směr X se provádí aritmetický průměr v poloze $C=0^\circ$ a $C=180^\circ$. Naopak pro směr Y se berou v potaz hodnoty z polohy $C=90^\circ$ a $C=270^\circ$:

$$DX = \frac{dx'(0^\circ) + dx'(180^\circ)}{2} \quad (8.5)$$

$$DY1 = \frac{dy'(90^\circ) + dy'(270^\circ)}{2} \quad (8.6)$$

Po dosažení naměřených hodnot:

$$DX = \frac{(-0,001) + 0,018}{2} = \mathbf{0,0085 \text{ mm}} \quad (8.7)$$

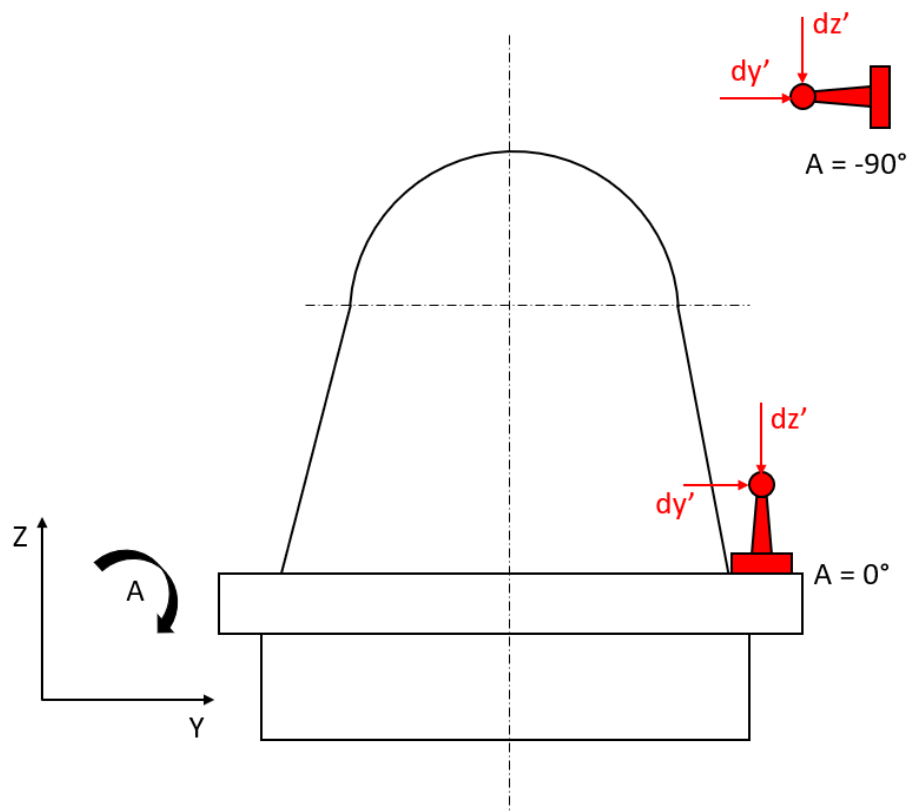
$$DY1 = \frac{0,020 + (-0,002)}{2} = \mathbf{0,009 \text{ mm}} \quad (8.8)$$

Vypočtené hodnoty parametrů je možno použít do řídicího systému jako kompenzace. V řídicím systému stroje MCU 700 je od výrobce přítomna tabulka dostupná z umístění TNC\KINEMATIC\POS_TAB_SEL-DCM. V této tabulce se vyplňuje hodnota DX do parametru Q5 a hodnota DY1 do parametru Q6. Po zapsání hodnot do paměti je možno provést kontrolu opětovným projetím programu a zapsáním výchylek na úchylkoměru. Druhou možností kompenzace je vynulování parametrů Q5 a Q6 a vepsání naměřených hodnot přímo do strojního parametru MP960 v řídicím systému stroje. Hodnota Q5 se přičítá do parametru MP960.0 a hodnota Q6 se přičítá do parametru MP960.1.

Obdobným postupem bylo provedeno měření interpolace osy A a lineárních os Y a Z. V tomto případě byl naprogramován pohyb osy A z polohy A = 0° do polohy A = -90°. V obou těchto polohách byly z úchylkoměru odečteny výchylky dy' a dz'. Na obrázku 8-11 je zobrazeno schéma měřených poloh. V další tabulce 8-4 jsou uvedeny naměřené hodnoty.

Měření při C = 0° - INTERPOLACE YZ		
Poloha osy A [°]	dy' [mm]	dz' [mm]
0	0	0
-90	0,002	0,004

Tabulka 8-4 - Naměřené hodnoty interpolace v rovině YZ



Obrázek 8-11 - Schéma měření při interpolaci osy A

Stejně jako v případě předchozího měření, podle daných vzorců spočítáme finální hodnotu dvou parametrů:

$$DY2 = dz'(-90^\circ) - \frac{dz'(-90^\circ) + dy'(-90^\circ)}{2} \quad (8.9)$$

$$DZ = \frac{dz'(-90^\circ) + dy'(-90^\circ)}{2} \quad (8.10)$$

Po dosazení naměřených dat z tabulky 9-4:

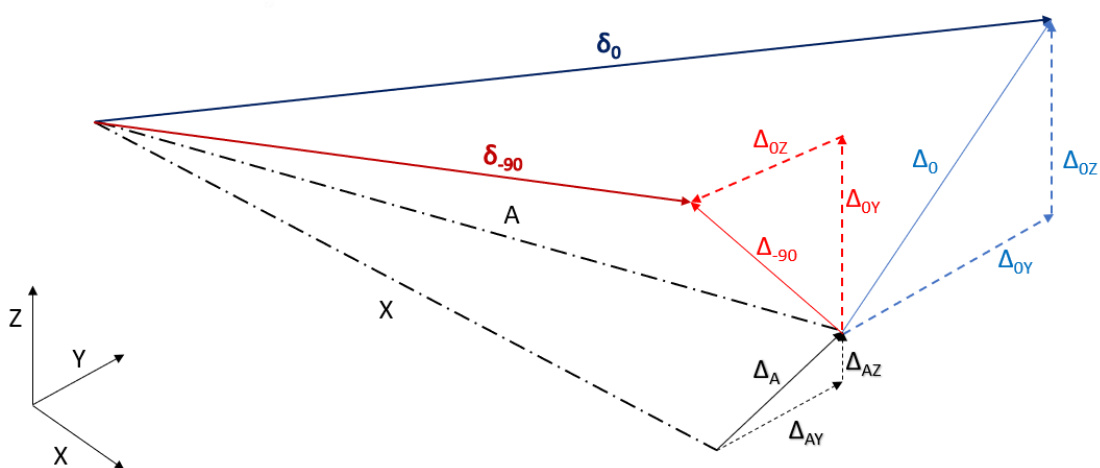
$$DY2 = 0,004 - \frac{0,004 + 0,002}{2} = -0,001 \text{ mm} \quad (8.11)$$

$$DZ = \frac{0,004 + 0,002}{2} = 0,003 \text{ mm} \quad (8.12)$$

Stejně jako u měření interpolace osy C i tyto dvě vypočtené hodnoty se dají implementovat do řídicího systému ve formě kompenzace chyby. Do tabulky z umístění TNC\KINEMATIC\POS_TAB_SEL-DCM je doplněn parametr DY2 na místo parametru Q12 a parametr DZ doplněn na místo parametru Q11.

8.4 Vyhodnocení měření chyby osy A

Pro změření chyby osy A byl stanoven postup popsáný v kapitole 7.4. Pomocí jednotlivých měření výchylky mezi dvěma body (koncovými měrkami) byly zjištěny hodnoty chyby otočně – sklopného stolu do jednotlivých směrů souřadného systému stroje. Pro lepší představu směru jednotlivých měřených chyb a jejich vlivu na polohu osy A byl vytvořen chybový vektor δ_0 a δ_{-90} pro polohy $A=0^\circ$ a $A=-90^\circ$, viz obrázek 8-12. Tyto vektory lze dále rozdělit na jednotlivé složky Δ_A a Δ_0/Δ_{-90} . Vektor Δ_A představuje chybu samotného ustavení kolébky v pracovním prostoru stroje a je dále rozdělen na složky ve směru Y a Z. Vektory Δ_0 a Δ_{-90} představují chybu samotné desky stolu vůči zbytku kolébky a opět je složen ze složek ve směru Y a Z.



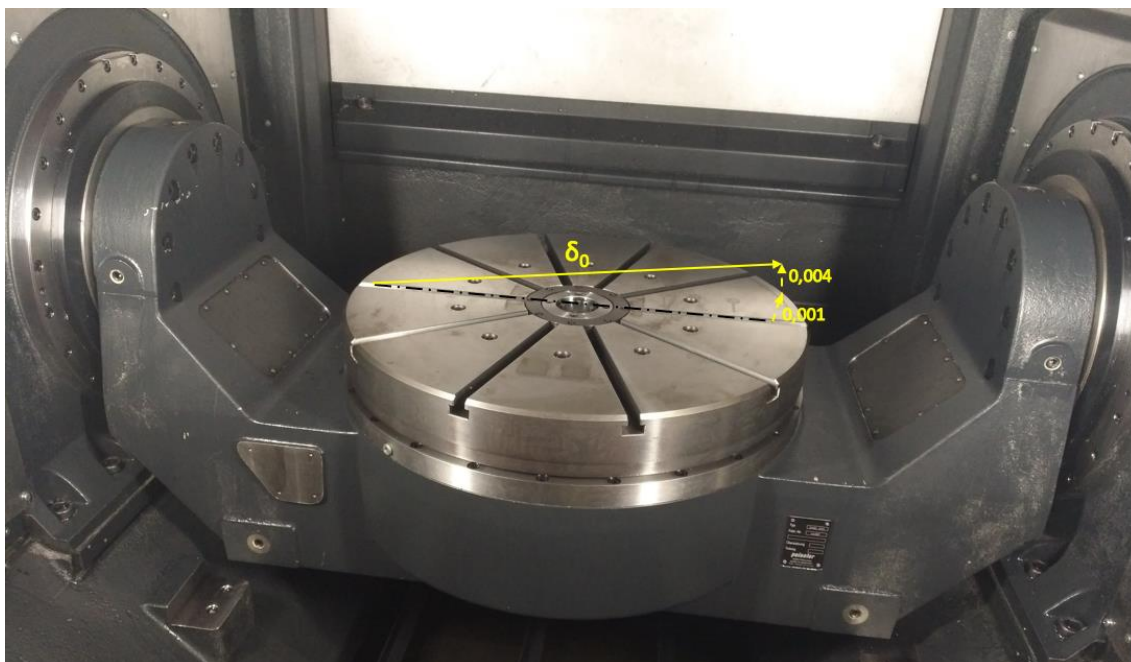
Obrázek 8-12 - Vektor chyby osy A v prostoru

V další tabulce 8-5. jsou již uvedeny naměřené hodnoty. Provedené měření nerozlišuje chybu samotného ustavení kolébky a chybu stolu, proto byly naměřeny jen výsledné hodnoty složek vektoru δ_0 a δ_{-90} do směrů Y a Z. Kladné hodnoty naměřených chyb odpovídají kladným hodnotám jednotlivých složek chybového vektoru na obrázku 8-12.

Naměřené hodnoty chyby osy A – zpevněno		
Chyba δ_0	C = 0°	C = 180°
δ_{0Y} [mm]	0,001	-0,007
δ_{0Z} [mm]	0,004	-0,014
Chyba δ_{-90}	C = 0°	C = 180°
δ_{-90Y} [mm]	0,004	0,007
δ_{-90Z} [mm]	0,014	-0,015

Tabulka 8-5 - Naměřené hodnoty chyby osy A

Pro představu je naznačen na obrázku 8-13 vektor δ_0 v pracovním prostoru stroje.



Obrázek 8-13 - Chybový vektor δ_0 v pracovním prostoru stroje v poloze A = 0°

Důležitým parametrem při uvádění naměřených výchylek je měřená délka $L = 570$ mm. Při změně měřené délky se hodnoty chyb budou měnit a je nutné tyto výchylky vztahovat k této měřené délce.

Pro rozlišení chyby ustavení kolébky a chyby samotné desky stolu byl použit výpočet s pomocí naměřených hodnot a předpokladu naznačeného na obrázku 8-12. Základním předpokladem pro výpočet je fakt, že chyba ustavení kolébky (na obrázku 8-12 vyznačena

černě) se s otočením stolu nemění a otočení na ni nemá vliv. Při změně polohy osy A se ale natočí chyba desky stolu o stejný úhel. Při měřené poloze $A = -90^\circ$ se tedy i chyba desky stolu natočí o -90° . Chybu osy A a chybu desky stolu lze poté oddělit pomocí soustavy 4 rovnic o 4 neznámých. První dvojice rovnic vyplývá z naměřených hodnot vektoru δ_0 .

$$\delta_{0Y} = \Delta_{AY} + \Delta_{0Y} \quad (8.13)$$

$$\delta_{0Z} = \Delta_{AZ} + \Delta_{0Z} \quad (8.14)$$

Druhá dvojice rovnic vychází ze složek vektoru δ_{-90} (obrázek 8-12) v poloze $A = -90^\circ$:

$$\delta_{-90Y} = \Delta_{AY} - \Delta_{0Z} \quad (8.15)$$

$$\delta_{-90Z} = \Delta_{AZ} + \Delta_{0Y} \quad (8.16)$$

Vyjádřením neznámých Δ_{0Y} a Δ_{0Z} z prvních dvou rovnic a dosazením do třetí a čtvrté rovnice zredukujeme soustavu na dvě rovnice o dvou neznámých:

$$\delta_{-90Y} = \Delta_{AY} + \Delta_{AZ} - \delta_{0Z} \quad (8.17)$$

$$\delta_{-90Z} = \Delta_{AZ} - \Delta_{AY} + \delta_{0Y} \quad (8.18)$$

Po dosazení známých naměřených hodnot:

$$0,004 = \Delta_{AY} + \Delta_{AZ} - 0,004 \quad (8.19)$$

$$0,014 = \Delta_{AZ} - \Delta_{AY} + 0,001 \quad (8.20)$$

Z těchto dvou rovnic již lze vyjádřit a vypočítat obě neznámé složky chyby ustavení osy A. Z první rovnice lze vyjádřit neznámou Δ_{AZ} :

$$0,008 - \Delta_{AY} = \Delta_{AZ} \quad (8.21)$$

Po dosazení do druhé rovnice:

$$0,013 = 0,008 - \Delta_{AY} - \Delta_{AY} \quad (8.22)$$

$$0,005 = -2\Delta_{AY} \quad (8.23)$$

$$\Delta_{AY} = -0,0025 \text{ mm} \quad (8.24)$$

Po zpětném dosazení této hodnoty do rovnice 8.21 určíme druhou složku chyby:

$$0,008 + 0,0025 = \Delta_{AZ} \quad (8.25)$$

$$\Delta_{AZ} = 0,0105 \text{ mm} \quad (8.26)$$

Pomocí této jednoduché úvahy lze tedy přibližně určit podíl samotné chyby osy A na celkové naměřené odchylce. Se znalostí těchto chyb lze poté dopočítat i chyby desky stolu $\Delta_{OY} = 0,0035 \text{ mm}$ a $\Delta_{OZ} = -0,0065 \text{ mm}$. Všechny dané hodnoty jsou opět vztaženy k měřené délce $L = 570 \text{ mm}$. V této poloze byla přibližně upnuta i referenční koule při měření kinematiky. V některých případech je přehlednější vztažení těchto naměřených veličin na 1 m měřené délky. V tomto případě budou hodnoty chyby ustavení osy A rovny:

$$\Delta_{AY} = -0,0044 \text{ mm} / \text{m} \quad (8.27)$$

$$\Delta_{AZ} = 0,0184 \text{ mm} / \text{m} \quad (8.28)$$

Dalším vlivem, který byl předmětem zkoumání této diplomové práce, byl vliv zpevnění osy A na naměřené hodnoty chyby osy A. V tomto případě bylo v řídicím systému vypnuto zpevnění osy A a znovu provedeno stejné měření. Zaznamenané hodnoty z úchylkoměru jsou zobrazeny v další tabulce 8-6:

Naměřené hodnoty chyby osy A – nezpevněno		
Chyba δ_0	C = 0°	C = 180°
δ_{0Y} [mm]	0,004 ↑300%	-0,01 ↑43%
δ_{0Z} [mm]	0,004 0%	-0,014 0%
Chyba δ_{-90}	C = 0°	C = 180°
δ_{-90Y} [mm]	0,003 ↓25%	0,01 ↑43%
δ_{-90Z} [mm]	0,022 ↑57%	-0,016 ↑7%

Tabulka 8-6 - Naměřené hodnoty chyby osy A pro nezpevněnou osu A

Z naměřených hodnot vyplývá, že zpevnění osy má na výslednou chybu příznivý vliv. Ve většině případů byla naměřená úchylka větší u nezpevněné osy než u zpevněné. To dokazuje procentuální vyjádření nárůstu nebo poklesu naměřených hodnot v tabulce 8-6. V průměru činil nárůst jednotlivých chyb 53%. Zároveň se při zpevnění nemění směr naměřených úchylek, jen jejich velikost.

Posledním bodem při měření osy A bylo zatížení stolu definovanou hmotností a opětovné proměření chyby osy A. Na stůl byla upnuta závaží o celkové hmotnosti 300 kg a opět byl proveden celý cyklus měření. Naměřené hodnoty z této části měření jsou uvedeny v tabulce 8-7.

Naměřené hodnoty chyby osy A – zátěž 300 kg		
Chyba δ_0	C = 0°	C = 180°
δ_{0Y} [mm]	0,017 ↑325%	0,015 ↑50%
δ_{0Z} [mm]	-0,008 ↑100%	-0,004 ↓71%
Chyba δ_{-90}	C = 0°	C = 180°
δ_{-90Y} [mm]	-0,018 ↑500%	0,028 ↑180%
δ_{-90Z} [mm]	-0,009 ↓59%	-0,009 ↓44%

Tabulka 8-7 - Naměřené hodnoty chyby osy A při zatíženém stole

Naměřené hodnoty byly pro srovnání porovnány s naměřenými hodnotami z měření chyby osy A bez zátěže na stole. Měření se zátěží bylo prováděno při nezpevněné ose, tudíž budou porovnány právě s hodnotami bez zátěže pro nezpevněnou osu A.

Při porovnání hodnot je patrné, že při měření se zátěží se výrazně změnila jak velikosti výchylek, tak jejich směry a nelze pozorovat žádný trend navazující na hodnoty bez zátěže. Příčinou tohoto jevu může být několik faktorů. Nejdůležitějším faktorem je samotná zátěž, která byla umístěna na stole. Zátěž způsobí deformaci stolu a naměřené výchylky jsou tudíž odlišné od výchylek naměřených bez zátěže. Dalším vlivem může být fakt, že měření se zátěží bylo prováděno z časových důvodů v jiném termínu než měření bez zátěže. Ustavení koncových měrek v drážce stolu tedy nebylo stejné a při dané výrobní přesnosti drážek (obvykle tolerance H7) je pravděpodobné, že ustavení může mít vliv na naměřené výchylky. Zároveň na stroji mezi měřeními probíhala jiná měření a zkoušky obrábění. I tento fakt může vnést do měření další nejistotu.

V tabulce 8-7 je opět uvedeno procentuální vyjádření nárůstu nebo poklesu naměřených hodnot. Z důvodu změny směrů byla porovnávána jen velikost chyby v absolutní hodnotě. Směr naměřené výchylky tedy nehraje roli. Průměrný nárůst naměřených výchylek při měření se zátěží činil v porovnání s měřením nezpevněné osy bez zátěže 123%. Z tohoto čísla vyplývá, že při zatížení stolu se absolutní velikost chyby zvyšuje. Stejně jako v případě chyby osy A bez zátěže i zde jde dosazením do rovnic 8.13 až 8.16 oddělit samotnou chybu ustavení kolébky v pracovním prostoru. Po dosazení jsou tyto hodnoty rovny:

$$\Delta_{AY} = 0,000 \text{ mm} \quad (8.29)$$

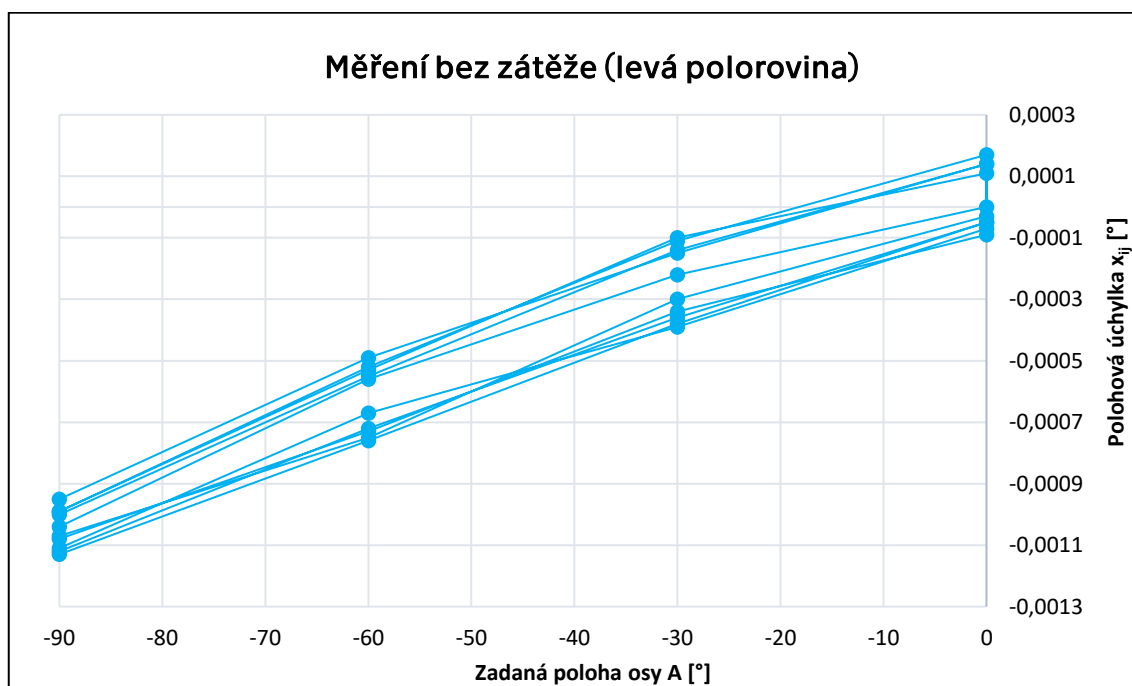
$$\Delta_{AZ} = -0,026 \text{ mm} \quad (8.30)$$

Tyto hodnoty jsou opět vztaženy na měřenou délku $L = 570 \text{ mm}$. Při porovnání je znatelná změna oproti měření bez zátěže. V případě směru Y vyšla chyba ustavení kolébky rovna nule. V případě směru Z se směr chyby obrátil a absolutní hodnota chyby je větší než při měření bez zátěže. Možné vlivy, které mají na tuto změnu dopad, již byly popsány pod tabulkou 8-7 s naměřenými hodnotami.

8.5 Vyhodnocení chyby polohování osy A

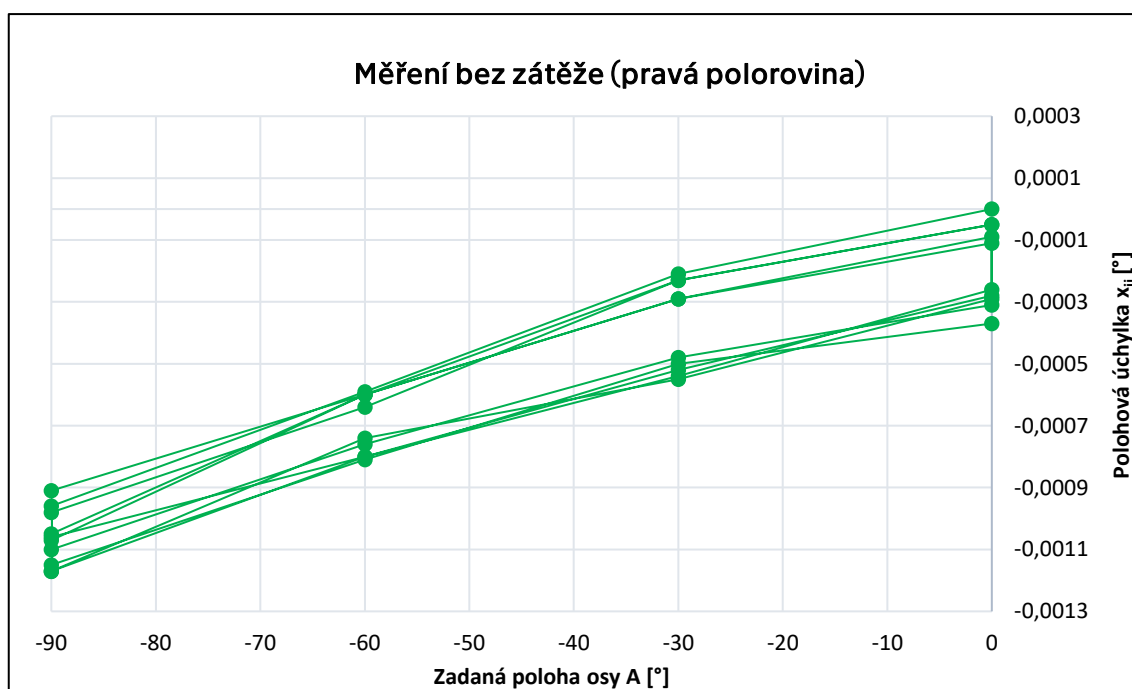
Posledním prováděným měřením bylo určení přesnosti polohování osy A. Pro toto měření byla využita aparatura od firmy Renishaw jejíž součástí je i vyhodnocovací software. Výhodou tohoto softwaru je přímé vyhodnocení naměřených dat dle různých norem zahrnujících i normu ISO 230-2. Další výhodou je kompenzátor XC – 80, který automaticky kompenzuje naměřenou teplotu prostředí, tlak vzduchu a relativní vlhkost.

Stejně jako u měření chyby osy A i při tomto měření byla porovnávána naměřená data bez zátěže na stole a se zatíženým stolem. Dalším porovnání bude provedeno pro data naměřená v levé polovině pracovního prostoru a v pravé polovině pracovního prostoru (obě měření probíhala bez zátěže na stole). V této kapitole budou nejprve uvedena naměřená data z jednotlivých měření a v závěru budou uvedeny parametry podle ISO 230-2. Tyto parametry budou vzájemně porovnány pro všechna tři měření. Výstupy ze softwaru pro všechna tři měření jsou uvedeny v příloze diplomové práce. Pro měření byly zvoleny 4 zadané polohy tak, aby bylo splněno minimum 3 zadaných poloh pro rozsah 90° dle normy ISO 230-2 [8]. Celý cyklus byl opakován pětkrát. Zároveň byl na koncových polohách naprogramován přejezd 5° za každou zadanou koncovou polohu. Na prvním grafu na obrázku 8-14 je již zobrazen graf naměřených hodnot pro polohování osy A bez zátěže v levé polovině pracovního prostoru.



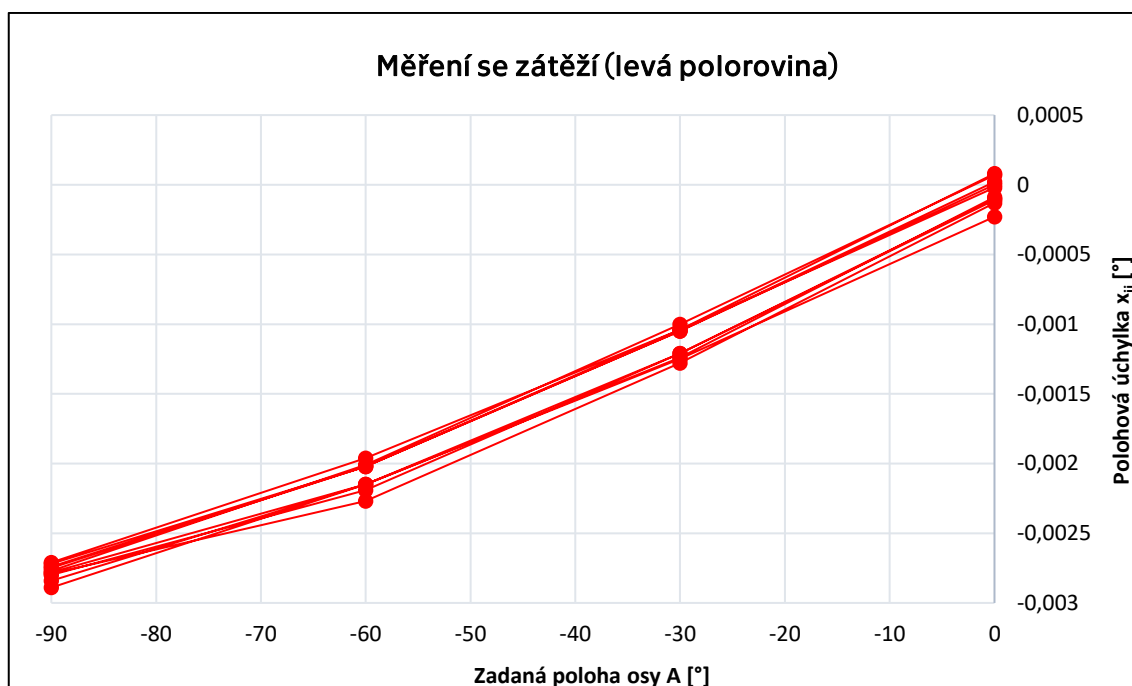
Obrázek 8-14 - Naměřené hodnoty polohové úchylnky osy A bez zátěže v levé polovině

Z grafu naměřených hodnot je patrná hystereze při kladném a záporném smyslu pohybu polohování osy A. Hystereze může být zapříčiněna vůlí v pohyblivých částech stroje. Stejný jev je patrný na grafu naměřených hodnot z pravé poloviny pracovního prostoru na obrázku 8-15. Zároveň je při porovnání obou grafů měřených bez zátěže v rozdílných polorovinách patrná podobnost. Bližší porovnání bude provedeno v tabulce 8-8 s výslednými parametry všech tří měření.



Obrázek 8-15 - Naměřené hodnoty polohové úchylky osy A bez zátěže v pravé polovině

Na dalším obrázku 8-16 je zobrazen graf naměřených hodnot se zátěží. Při tomto měření byla na stole upnuta závaží o celkové hmotnosti 300 kg. Z údajů na svislé ose je patrné, že naměřené hodnoty polohové úchylky x_{ij} jsou po zatížení stolu vyšší než při měření bez zátěže. Výsledné hodnoty všech potřebných parametrů dle normy ISO 230-2 jsou opět uvedeny v tabulce 8-8.



Obrázek 8-16 - Naměřené hodnoty polohové úchylky osy A se zátěží v levé polovině

V tabulce 8-8 jsou již uvedeny výsledné parametry všech tří měření dle ISO 230-2. Pro přehlednost jsou za tabulkou vysvětleny všechny pojmy a značení.

Výsledné parametry chyby polohování osy A			
	Bez zátěže (vlevo)	Bez zátěže (vpravo)	Zátěž 300 kg
\bar{B} [°]	-0,00017	-0,00021	-0,00016
B [°]	0,00021	0,00027	0,00020
R ↑ [°]	0,00014	0,00019	0,00023
R ↓ [°]	0,00026	0,00026	0,00018
R [°]	0,00038	0,00042	0,00037
M [°]	0,00107	0,00088	0,00273
E ↑ [°]	0,00104	0,00083	0,00269
E ↓ [°]	0,00110	0,00093	0,00277
E [°]	0,00121	0,00107	0,00285
A ↑ [°]	0,00114	0,00101	0,00290
A ↓ [°]	0,00130	0,00115	0,00290
A _A [°]	0,00140	0,00126	0,00303

Tabulka 8-8 - Výsledné parametry chyby polohování osy A dle normy ISO 230-2

V následující části textu jsou vysvětleny všechny značky použité v tabulce 8-8. Z důvodu konfliktu se značením osy A je dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose označena rozdílně oproti normě ISO 230-2 jako A_A :

\bar{B} – Průměrná necitlivost v ose

B – Necitlivost v ose

$R \uparrow / R \downarrow$ – Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose

R – Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v ose

$E \uparrow / E \downarrow$ – Jednostranná systematická polohová úchylka v ose

E – Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose

M – Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose

$A \uparrow / A \downarrow$ – Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose

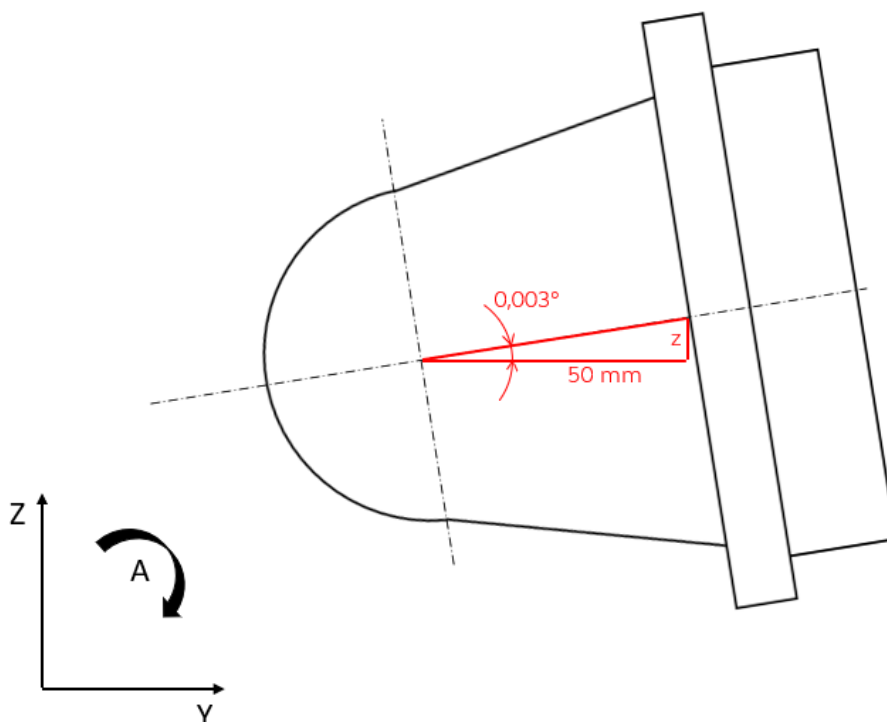
A_A – Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose

První zjištěním při porovnání vyhodnocených parametrů obou měření bez zátěže je fakt, že parametry se při změně polohy v pracovním prostoru zásadně nezměnily. Výsledná dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose (A_A) klesla v případě měření v pravé polorovině pracovního prostoru jen o 10 %. Obdobný pokles byl zaznamenán i u ostatních vyhodnocovaných parametrů. Lze tedy říci, že místo měření v pracovním prostoru nemá zásadní vliv na naměřenou chybu polohování osy A.

Znatelnější rozdíly ve vyhodnocených parametrech je možné sledovat při porovnání hodnot naměřených bez zátěže a se zátěží. Prvním z poznatků plynoucích z tohoto srovnání je fakt, že na parametry charakterizující necitlivost v ose (\bar{B} , B) a opakovatelnost nastavení polohy (R , $R \uparrow$, $R \downarrow$) nemá zatížení stolu zásadní vliv. Tyto parametry byly v některých případech při zatížení stolu ještě nižší než v případě nezatíženého stolu. Při porovnání zbývajících parametrů je již patrný výrazný nárůst. Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose (A_A) se zvýšila o 116 %. Tento nárůst už znatelně ovlivňuje výslednou přesnost polohování otočně – sklopného stolu. Vzhledem k tomu, že vzdálenost desky stolu od osy rotace je 50 mm, lze tuto úhlovou chybu pro představu přepočítat přes goniometrickou funkci tangens na chybu lineární. Princip výpočtu je naznačen na obrázku 8-17.

$$z = 50 \cdot \tan 0,003^\circ \quad (8.31)$$

$$z = 0,0026 \text{ mm} \quad (8.32)$$



Obrázek 8-17 - Schéma pro přepočet úhlové chyby

Z tohoto jednoduchého výpočtu vyplývá, že úhlová chyba $0,003^\circ$ s sebou přináší chybu přibližně $0,003 \text{ mm}$ v lineárních souřadnicích. Dle katalogu výrobce [6] je maximální možné zatížení stolu rovno 850 kg . Hodnota vypočítané chyby (rovnice 8.32) vyplývá z hodnot naměřených při hmotnosti závaží 300 kg . Lze tedy očekávat, že při navýšení zatížení stolu na maximální hodnoty udávané výrobcem se chyba polohování může ještě zvyšovat. Zmíněná chyba může také nepříznivě působit na měření kinematiky, které bylo v rámci této práce taktéž realizováno. V případě měření bez zátěže bude hodnota chyby z přibližně $0,001 \text{ mm}$. Tato hodnota se může promítnout do výsledné výchylky změřené úchylkoměrem.

V případě naměřené chyby polohování stojí za zmínku i porovnání naměřených hodnot s tolerancemi nastavení polohy dle normy ČSN ISO 10791-4 [10]. V následující tabulce 8-9 jsou porovnány výsledné parametry z měření se zátěží s hodnotami tolerancí dle zmíněné normy ČSN ISO 10791-4. Norma definuje hodnoty v úhlových vteřinách, proto byly na tyto jednotky převedeny i parametry z tabulky 8-8.

Porovnání výsledných parametrů s normou		
	Tolerance dle normy	Zátěž 300 kg
\bar{B} ["]	8	-0,58
B ["]	12	0,72
R ↑ ["]	8	0,83
R ↓ ["]	8	0,65
R ["]	16	1,33
M ["]	12	9,83
E ↑ ["]	14	9,68
E ↓ ["]	14	9,97
E ["]	20	10,26
A ↑ ["]	22	10,44
A ↓ ["]	22	10,44
A _A ["]	28	10,91

Tabulka 8-9 - Srovnání parametrů se zátěží s tolerancemi dle normy

Z tabulky je patrné, že všechny hodnoty jsou podbarveny zeleně, tudíž jsou v mezích tolerance dle normy ČSN ISO 10791-4. Ačkoliv norma ISO 230-2 definuje zkoušku přesnosti polohování bez zatížení stolu, vyhodnocené parametry vyhovují i po zatížení otočně – sklopného stolu. Ve většině případů mají vyhodnocené parametry ještě znatelnou rezervu před překročením toleranční meze. Z toho vyplývá, že ačkoliv má zátěž na přesnost polohování nepříznivý vliv, vyhodnocené parametry jsou stále v mezích tolerance, což je pozitivní zjištění.

Norma ISO 230-2 [8] dále uvádí i postup při určování nejistot měření, které jsou pro finální interpretaci naměřených dat velmi důležité. V rámci rozsahu této diplomové práce šlo ovšem primárně o porovnání naměřených dat před a po zatížení a samotný výpočet nejistot nebyl realizován.

9 Závěr

9.1 Zhodnocení diplomové práce

Předložená diplomová práce se zabývá analýzou přesnosti otočně – sklopného stolu stroje MCU 700 od firmy Kovosvit MAS. Požadavkem firmy byl návrh postupu měření otočně – sklopného stolu a následné vyhodnocení naměřených dat se zaměřením na rotační osu A. Dalším požadavkem bylo určení vlivu zatížení stolu na výsledné naměřené chyby osy A.

Úvod diplomové práce byl věnován rešerši známých metod měření pětiosých obráběcích strojů a norem spojených s těmito metodami měření. Na základě provedené rešerše a požadavků firmy Kovosvit MAS byl následně navržen postup měření. Tento navržený postup měření byl následně postupně realizován přímo na stroji MCU 700 ve firmě Kovosvit MAS. Nejprve byla realizována měření přímostí a kolmostí lineárních os. Tato měření sloužila především jako informace o přesnosti pohybů os X, Y, Z, protože součástí dalších měření jsou i pohyby těchto os. Další měření kinematiky už se blíže věnovalo přesnosti samotného otočně – sklopného stolu. Výstupem z tohoto měření jsou 4 parametry, které je možno implementovat do řídicího systému jako kompenzace. Jedním z faktorů, které mohou ovlivňovat měření kinematiky je chyba osy A. Z tohoto důvodu bylo další měření navrženo pro zjištění dvou úhlových chyb osy A v pracovním prostoru stroje. Pro modelování této chyby bylo použito zjednodušení ve formě chybového vektoru, který je určen dvěma měřebními body na okrajích desky stolu. Tímto zjednodušením byla zajištěna možnost rychlého zjištění hodnot potřebných k vyhodnocení chyby osy A. Pro detailnější rozbor a přesnější výsledky by bylo vhodné zvolit jinou metodu měření s více měřebními body v celém pracovním prostoru. Zvolená metoda v této diplomové práci se totiž omezuje na aproximaci chyby v pracovním prostoru na základě pouhých dvou měřených bodů. Posledním provedeným měřením bylo měření přesnosti polohování osy A pomocí laserového interferometru.

V případě měření chyby osy A a přesnosti polohování osy A bylo navíc provedeno měření s upnutým závažím na desce stole. Porovnáním naměřených hodnot byl poté zkoumán vliv zatížení na chybu osy A a chybu přesnosti polohování osy A. Tato chyba byla vyhodnocena a vyjádřena v procentech. V obou případech byl nárůst chyby oproti

prázdnému stolu znatelný a vliv zatížení je nutno brát v potaz. Již v případě zatížení hmotností 300 kg byl nárůst chyby markantní, ale vyhodnocené parametry byly stále v mezích tolerancí dle normy ČSN ISO 10791-4. Maximální přípustná zátěž stolu dle výrobce je 850 kg a při zatížení touto hmotností se tedy dá očekávat další nárůst chyby. Ačkoliv norma ISO 230-2 definuje stroj bez obrobku bylo by zajímavé porovnat výsledky měření s normou i v případě měření s maximální zátěží na stole.

Vytyčené cíle práce byly splněny. Na základě provedené rešerše byl navržen postup měření, který byl následně i realizován přímo ve firmě Kovosvit MAS, která je zadavatel této diplomové práce. Postup měření i vyhodnocování dat byl následně detailně popsán v textu diplomové práce. Zároveň byl splněn i požadavek firmy Kovosvit MAS na určení vlivu hmotnosti zátěže na chybu otočně – sklopné stolu. Výstupem jednoho z provedených měření jsou parametry, které je možno implementovat do řídicího systému stroje jako kompenzace.

9.2 Další možný vývoj dané problematiky

Diplomová práce zároveň ponechává řadu otevřených témat a otázek, které už se svým rozsahem nevešly do rámce této diplomové práce. První z těchto problémů je porovnání provedených měření s jinou metodou měření. Například při měření chyby osy A by bylo možno použít jiný měřící artefakt než koncové měřky, jehož ustavení v pracovním prostoru by bylo přesnější a zmenšil se tak prostor pro chybu samotným ustavením měřícího artefaktu. Zároveň by se použitím jiného způsobu měření dala porovnat naměřená data a vyvodit z toho odpovídající závěry o správnosti zvoleného postupu měření a následného vyhodnocování samotných dat. Další možnou metodou pro porovnání při měření kinematiky je použití měřící sondy. Tak jako v předchozím případě by se i při tomto měření dala porovnat naměřená data a vyvodit závěry o přesnosti dané metody. Obdobné porovnání s jinými metodami měření by bylo možné provést i v případě měření přímostí a kolmostí lineárních os.

V souvislosti s měřením chyby osy A přichází i otázka, jak kompenzovat tuto chybu. Z měření vyplývá, že na naměřenou chybu má vliv funkce zpevnění osy A i zátěž na stole. V těchto případech se naměřená chyby zvětšovala. Vzhledem k tomu, že tato chyba není

konstantní, není možné ji kompenzovat jednou hodnotou. Dalším měřením a výpočty by bylo možné zjišťovat dopady kompenzace různých naměřených chyb (prázdný stůl / zatížený stůl / střední hodnota chyby). S tím souvisí i možnost měření chyby osy A při různých hodnotách závaží na stole. Tím by vznikla detailnější informace, jaký vliv má konkrétní hmotnost na celkovou tuhost otočně – sklopného stolu. Obdobný experiment by bylo možné realizovat i s různým rozmístěním závaží na desce stolu a následným vyhodnocením jednotlivých chyb. Další možností by bylo i zkoumání tepelných vlivů na jednotlivé naměřené chyby. V této diplomové práci nebylo ovlivnění teplem vyhodnocováno, ale pro úplnou představu o chování jednotlivých chyb je i tato informace nezbytná. Dalším okruhem, který by bylo ve spojení s touto prací možno rozvíjet, je téma nejistot provedených měření. Nejistoty je vhodné uvádět u naměřených veličin pro úplnou vypovídající hodnotu těchto dat.

Pro detailnější rozbor chyby otočně – sklopného stolu by bylo možné provést řadu dalších měření, která s sebou ale přinášejí větší časovou náročnost celého postupu. Prostor pro detailnější rozbor chyb otočně – sklopného stolu přináší hlavně osa C, které nebyl poskytnut takový prostor především z časových důvodů a z důvodu požadavků firmy na rozbor chyby osy A. Pro komplexnější měření bez rozboru a rozlišování dílčích chyb by bylo vhodné zvolit vhodnější způsob měření než pomocí digitálního úchytkoměru, viz kapitola 5 a možné metody měření pětiosých obráběcích strojů.

Seznam obrázků

Obrázek 3-1 - Multifunkční pětiosé obráběcí centrum MCU 700 [7]	15
Obrázek 3-2 - Konstrukce skeletu stroje MCU 700 [6]	16
Obrázek 3-3 - Stroj MCU 700V - 5X SPEED ve firmě Kovosvit MAS	17
Obrázek 5-1 - Geometrické chyby rotačních os [13]	23
Obrázek 5-2 - Michelsonův interferometr [14]	24
Obrázek 5-3 - Princip laserového interferometru XL-80 [14]	25
Obrázek 5-4 - Základní schéma aparatury Optodyne RT100 [15]	26
Obrázek 5-5 - Systém XR-20-W firmy Renishaw [16]	27
Obrázek 5-6 - Lasertracer firmy ETALON AG [17]	27
Obrázek 5-7 - Konfigurace při měření Lasertracerem [17]	28
Obrázek 5-8 - Konfigurace pro kalibraci rotačních os stroje [18]	29
Obrázek 5-9 - Schéma laser-trackeru [19]	29
Obrázek 5-10 - Aparatura firmy IBS pro měření pětiosých strojů [20]	31
Obrázek 5-11 - Měření pomocí aparatury AxiSet od firmy Renishaw [23]	32
Obrázek 5-12 - Měření pomocí aparatury Ballbar [24]	33
Obrázek 5-13 - Postup obrábění zkušebního obrobku [25]	34
Obrázek 7-1 - Uspořádání pro měření přímosti osy X v rovině ZX	37
Obrázek 7-2 - Uspořádání pro měření přímosti dle normy ISO 230-1 [7]	38
Obrázek 7-3 – Uspořádání pro měření přímosti osy X v rovině XY	39
Obrázek 7-4 – Uspořádání pro měření přímosti osy Y v rovině YZ	39
Obrázek 7-5 - Uspořádání pro měření přímosti osy Z v rovině YZ	40
Obrázek 7-6 - Uspořádání pro měření kolmosti os X a Y	41
Obrázek 7-7 - Uspořádání pro měření kolmosti os X a Z	41
Obrázek 7-8 - Konfigurace pro měření kinematiky	43
Obrázek 7-9 - Měření interpolace během polohování v ose A	43
Obrázek 7-10 - Uspořádání pro měření chyby osy A	44
Obrázek 7-11 - Měření chyby osy A v poloze A=-90°	45
Obrázek 7-12 - Měření chyby osy A s detailním pohledem na koncové měřky	45
Obrázek 7-13 - Měření chyby osy A v poloze A=-90°	46
Obrázek 7-14 - Zatížený otočně - sklopný stůl	47
Obrázek 7-15 - Popis uspořádání pro měření přesnosti polohování osy A	48

Obrázek 7-16 - Kompenzátor XC - 80 se snímači.....	48
Obrázek 7-17 - Měření přesnosti polohování osy A v druhé rovině	49
Obrázek 7-18 - Měření přesnosti polohování osy A se zatíženým stolem	49
Obrázek 8-1 - Graf naměřených hodnot v ose X	50
Obrázek 8-2 - Schéma pro výpočet úchylky přímosti	51
Obrázek 8-3 - Upravená data chyby přímosti v ose X	51
Obrázek 8-4 - Princip vyhodnocení metody obráceného pravítka [7]	52
Obrázek 8-5 - Vyhodnocení chyby přímosti metodou obráceného pravítka	53
Obrázek 8-6 - Vyhodnocení dat chyby kolmosti dvou os [7]	55
Obrázek 8-7 - Naměřená výchylka v ose X	55
Obrázek 8-8 - Naměřená výchylka v ose Z	56
Obrázek 8-9 - Vyhodnocení chyby kolmosti os X a Z	56
Obrázek 8-10 - Schéma měření při interpolaci osy C	58
Obrázek 8-11 - Schéma měření při interpolaci osy A	60
Obrázek 8-12 - Vektor chyby osy A v prostoru	61
Obrázek 8-13 - Chybový vektor δ_0 v pracovním prostoru stroje v poloze $A = 0^\circ$	62
Obrázek 8-14 - Naměřené hodnoty polohové úchylky osy A bez zátěže v levé polorovině	67
Obrázek 8-15 - Naměřené hodnoty polohové úchylky osy A bez zátěže v pravé polorovině	68
Obrázek 8-16 - Naměřené hodnoty polohové úchylky osy A se zátěží v levé polorovině	69
Obrázek 8-17 - Schéma pro přepočítání úhlové chyby	71

Seznam tabulek

Tabulka 3-1 - Parametry stroje MCU 700 [6]	15
Tabulka 3-2 - Parametry otočného stolu [6]	17
Tabulka 8-1 - Výsledné hodnoty chyby přímosti jednotlivých os	54
Tabulka 8-2 - Výsledné chyby kolmosti pohybů jednotlivých os	57
Tabulka 8-3 - Naměřené hodnoty interpolace v rovině XY	58
Tabulka 8-4 - Naměřené hodnoty interpolace v rovině YZ	59
Tabulka 8-5 - Naměřené hodnoty chyby osy A	62
Tabulka 8-6 - Naměřené hodnoty chyby osy A pro nezpevněnou osu A	65
Tabulka 8-7 - Naměřené hodnoty chyby osy A při zatíženém stole	65
Tabulka 8-8 - Výsledné parametry chyby polohování osy A dle normy ISO 230-2	69
Tabulka 8-9 - Srovnání parametrů se zátěží s tolerancemi dle normy	72

Seznam použitých zdrojů

- [1] SVOBODA, Ondřej. Multifunkční obráběcí stroje a jejich geometrická přesnost. *Technický týdeník* [online]. 2016 [cit. 2019-02-21]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/prumysl/multifunkcni-objevy-ostroje-a-jejich-geometricka-presnost_37668.html
- [2] MORÁVEK, Martin. *Výzkum přesnosti pětiosých frézovacích center*. Praha, 2018. Disertační práce. ČVUT - Ústav výrobních strojů a zařízení. Vedoucí práce Pavel Bach.
- [3] G.H.J, Florussen a kolektiv. Assessing geometrical errors of multi-axis machines by three-dimensional length measurements. *Measurement* [online]. 2001, **2001**(30), 15 [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0263-2241\(01\)00016-1](https://doi.org/10.1016/S0263-2241(01)00016-1)
- [4] *O společnosti | KOVOSVIT MAS, a. s.* [online]. KOVOSVIT MAS, a.s., 2016 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/o-spolecnosti.html>
- [5] *Obráběcí stroje, CNC stroje, CNC soustruhy | KOVOSVIT MAS, a. s.* [online]. KOVOSVIT MAS, a.s., 2016 [cit. 2018-11-06]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/objevy-ostroje.html>
- [6] *MCU 700V[T]-5X | KOVOSVIT MAS, a. s.* [online]. KOVOSVIT MAS, a.s., 2016 [cit. 2018-11-06]. Dostupné z: https://www.kovosvit.cz/download/lightproducts_produkty_cs/1540365849_cs_1_88_mcu700cz-pl-web.pdf
- [7] *ČSN ISO 230-1: Zásady zkoušek obráběcích strojů: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek*. Třetí vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [8] *ČSN ISO 230-2: Zásady zkoušek obráběcích strojů: Část 2: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách*. Druhé vydání. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [9] *ČSN ISO 10791-2: Podmínky zkoušek pro obráběcí centra: Zkoušky geometrické přesnosti strojů se svislou osou vřetena nebo s univerzálními hlavami se svislou*

- primární osou otáčení (svislá osa Z)*. První vydání. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [10] ČSN ISO 10791-4: *Podmínky zkoušek pro obráběcí centra: Přesnost a opakovatelnost nastavení polohy v lineárních a otočných osách*. První vydání. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [11] ČSN ISO 10791-6: *Podmínky zkoušek pro obráběcí centra: Přesnost posuvů, frekvence otáčení a interpolací*. První vydání. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [12] BACH, Pavel. *Geometrická přesnost – Schlesingerova metoda* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2009 [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/11902640-Geometricka-presnost-schlesingerova-metoda.html>
- [13] ČSN ISO 230-7: *Zásady zkoušek obráběcích strojů: Část 7: Geometrická přesnost os rotace*. První vydání. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [14] Interferometry explained. *Renishaw* [online]. b.r. [cit. 2019-01-10]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/interferometry-explained--7854>
- [15] *Laser Doppler Displacement Meter™* [online]. OPTODYNE, INC., 2009 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <http://www.optodyne.it/inglese/brochures/OprationManuals.pdf>
- [16] XR20-W rotary axis calibrator. *Renishaw* [online]. b.r. [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/xr20-w-rotary-axis-calibrator--15763>
- [17] LaserTRACER-NG. *ETALON AG* [online]. b.r. [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://www.etalon-ag.com/en/products/lasertracer/>
- [18] SCHWENKE, H. On-the-fly calibration of linear and rotary axes of machine tools and CMMs using a tracking interferometer. *CIRP Annals – Manufacturing technology* [online]. 2009, (58) [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.007>
- [19] MALÝ, Pavel. *MĚŘENÍ GEOMETRICKÉ PŘESNOSTI OBRÁBĚCÍCH STROJŮ ZAŘÍZENÍM LASER TRACER*. Brno, 2014. Bakalářská práce. VUT Brno - Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Knobloch.

- [20] *Rotary inspector brochure* [online]. b.r. [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: http://ibspe.com/public/uploads/content/files/Rotary_Inspector_Brochure.pdf
- [21] Rotary axis analyzer. *IBS Precision Engineering* [online]. b.r. [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: <http://www.ibspe.com/category/rotary-analyzer.htm>
- [22] DMG/Mori Seiki Rotary Table Calibration with NC Gage. *Youtube* [online]. b.r. [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Gk8otAz08hk>
- [23] *Brochure: AxiSet™ Check-Up* [online]. První vydání. Renishaw plc, 2015 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/axiset-check-up--11353>
- [24] UDDIN, M.S., S. IBARAKI, A. MATSUBARA a T. MATSUSHITA. Rediction and compensation of machining geometric errors of five-axis machining centers with kinematic errors. *Precision Engineering* [online]. 2009, **33**(2), 7 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635908000810?via%3Dihub>
- [25] IBARAKI, S., M. SAWADA, A. MATSUBARA a T. MATSUSHITA. Machining tests to identify kinematic errors on five-axis machine tools. *Precision Engineering* [online]. 2010, **34**(3), 387-398 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014163590900169X?via%3Dihub>

Seznam příloh

Textové

Příloha 1: Naměřená a vyhodnocená data přímostí a kolmostí

Příloha 2: Grafický výstup ze softwaru Renishaw při měření polohování osy A

Příloha 3: Technické parametry stroje MCU 700 SPEED

Elektronické (CD)

Text diplomové práce (.pdf)

Textové přílohy (.pdf)

Zadání práce (.pdf)

Excelový soubor s naměřenými daty (.xlsx)

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

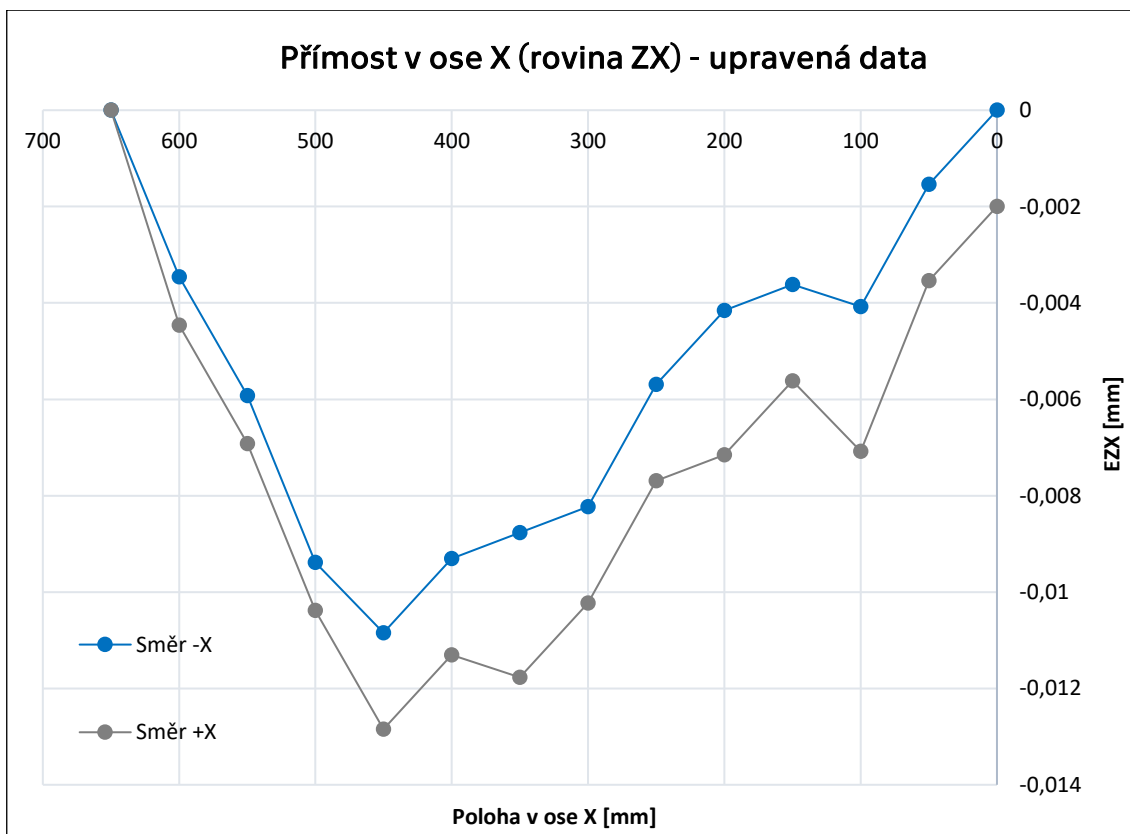
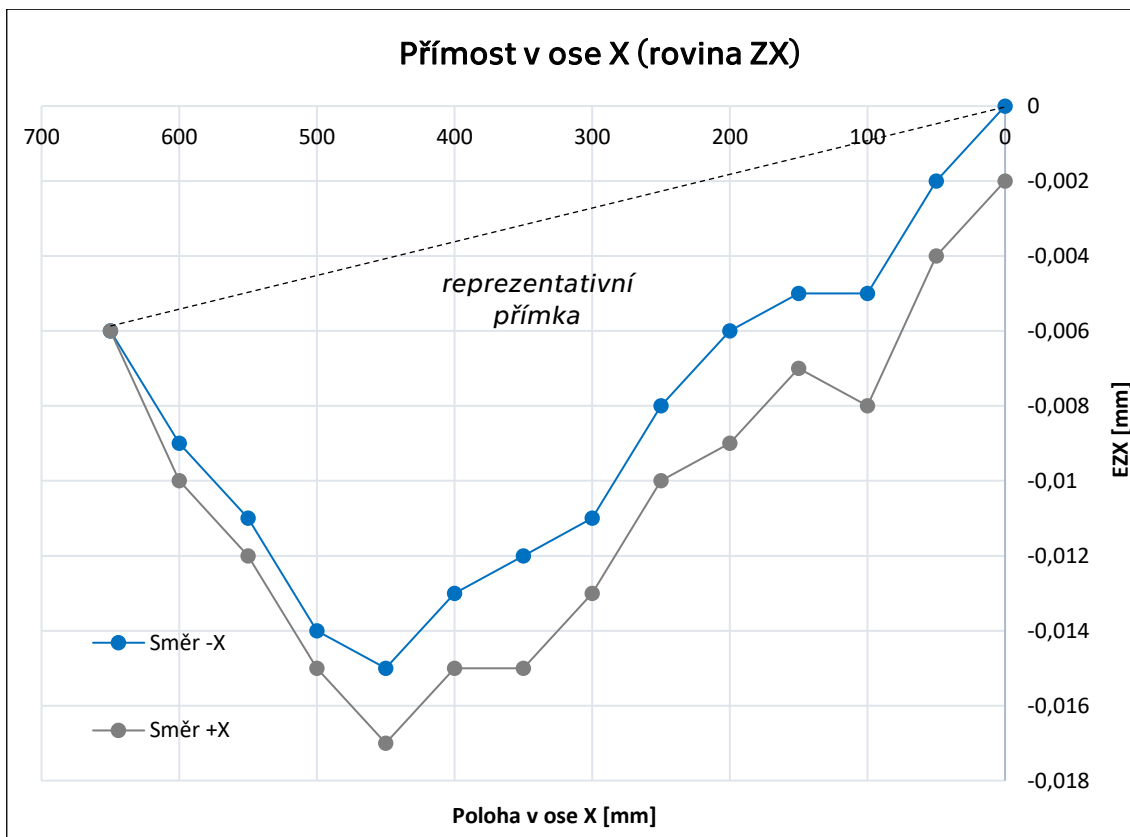
Analýza přesnosti otočného stolu MCU 700

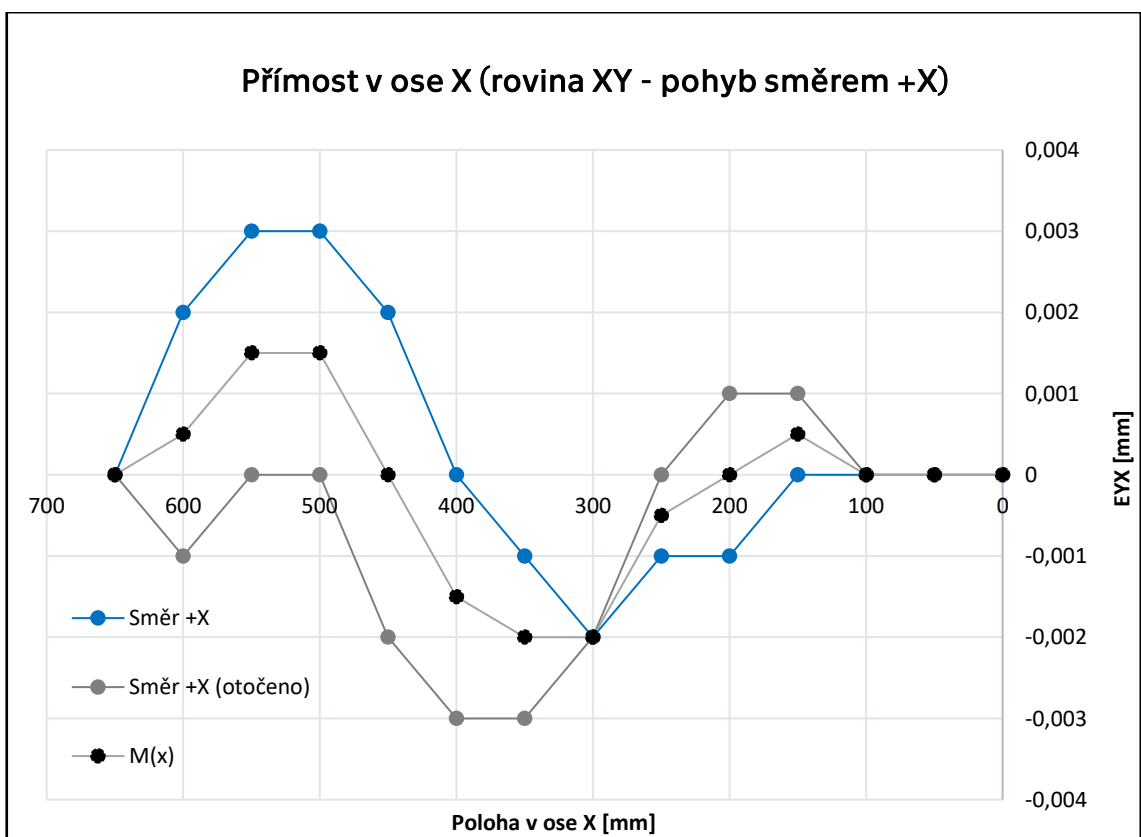
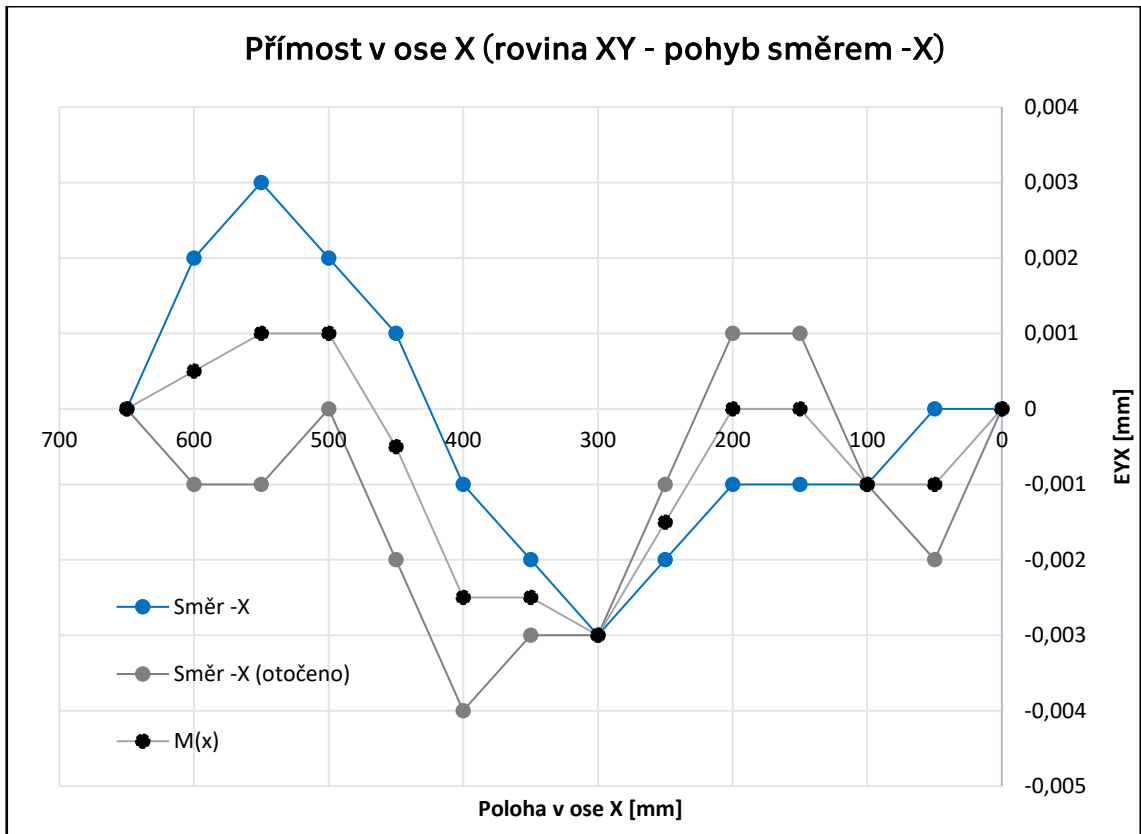
Textové přílohy

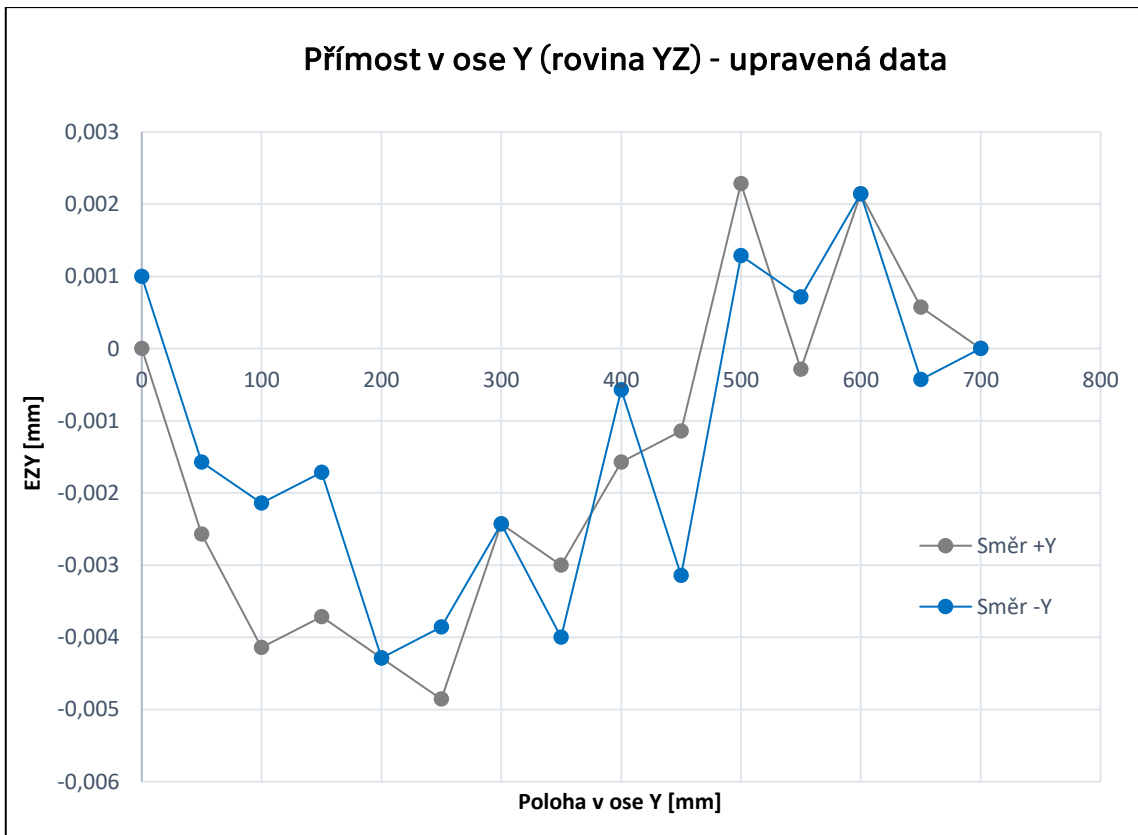
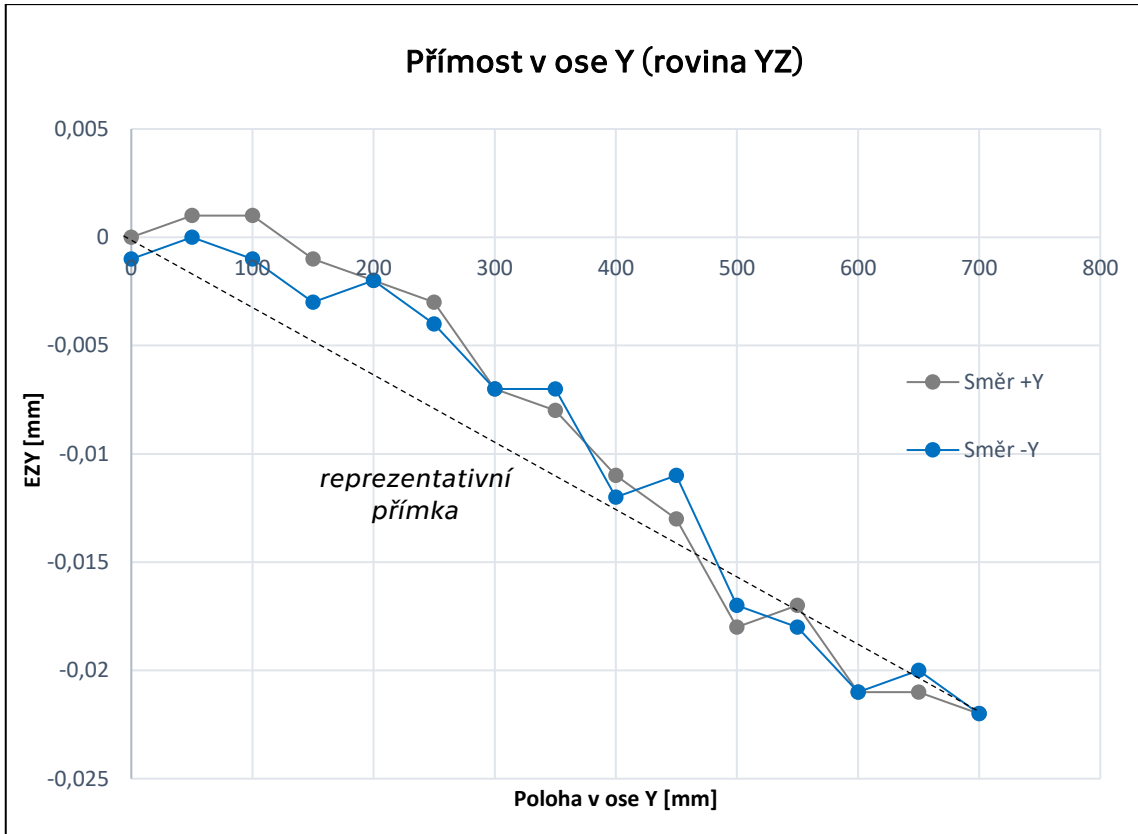
2019

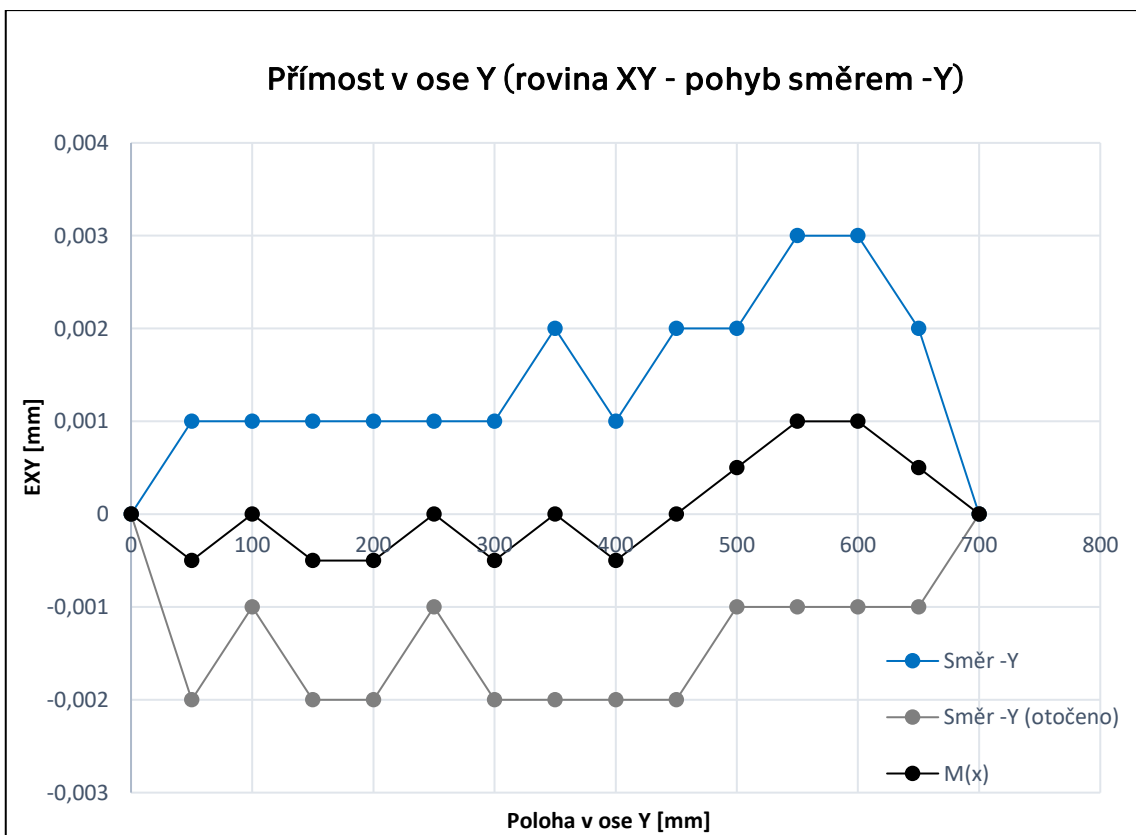
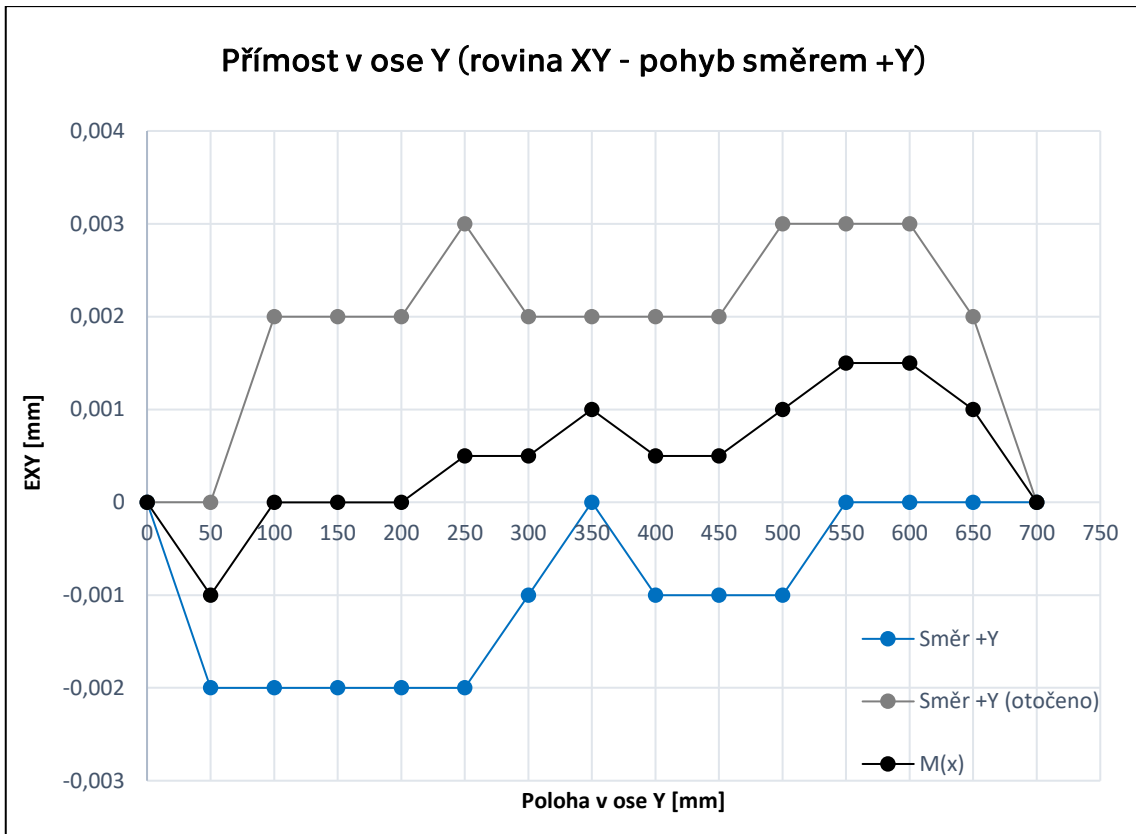
Bc. Jiří Štecher

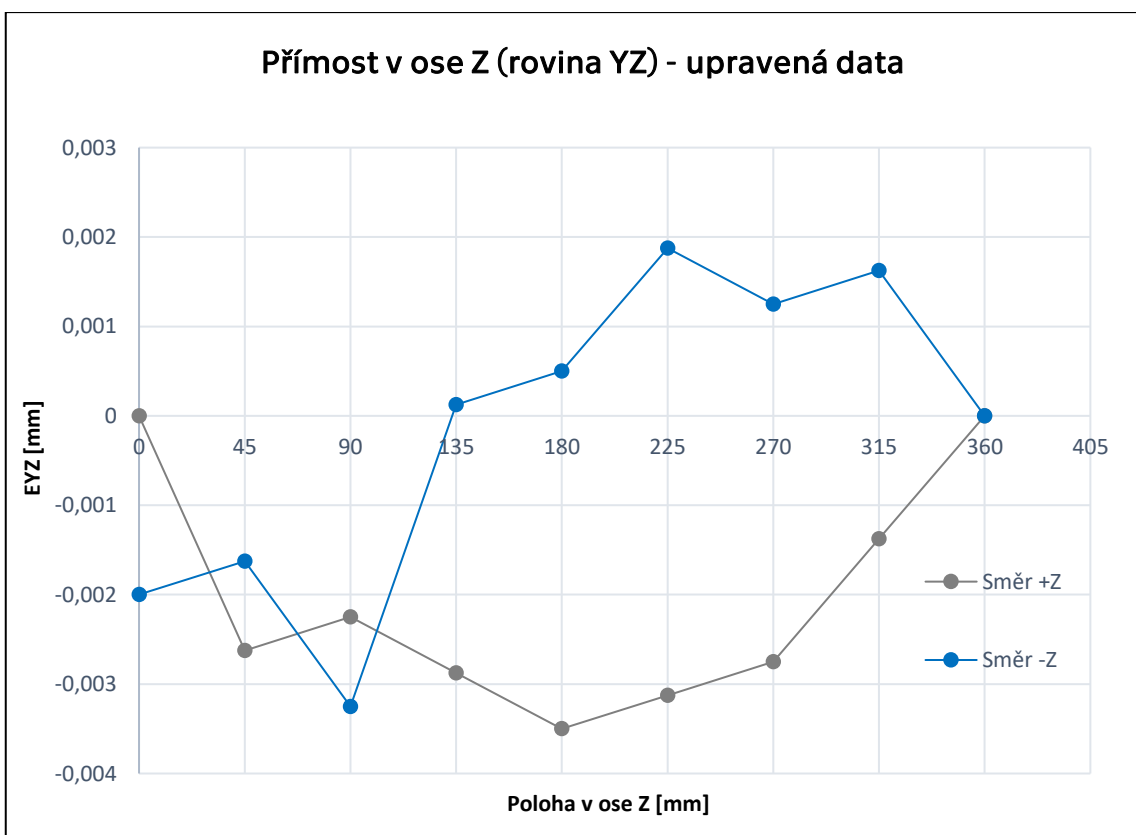
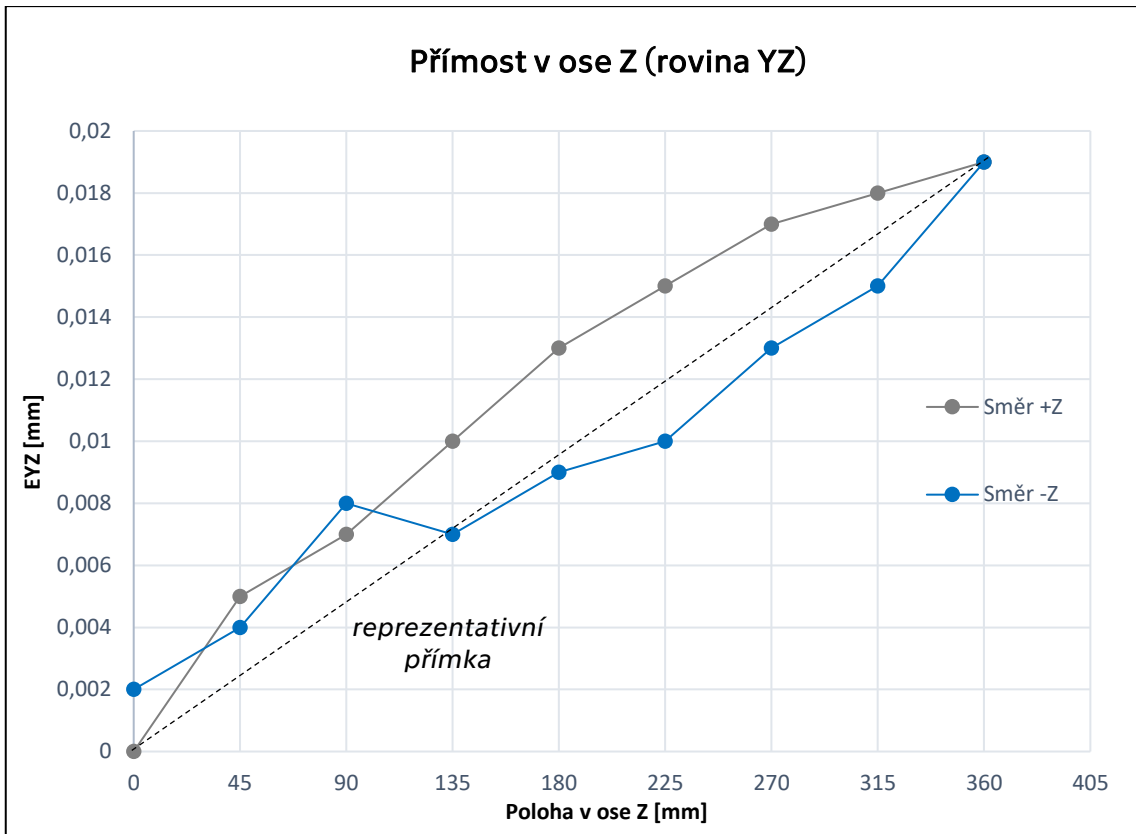
Příloha 1: Naměřená a vyhodnocená data přímostí a kolmostí

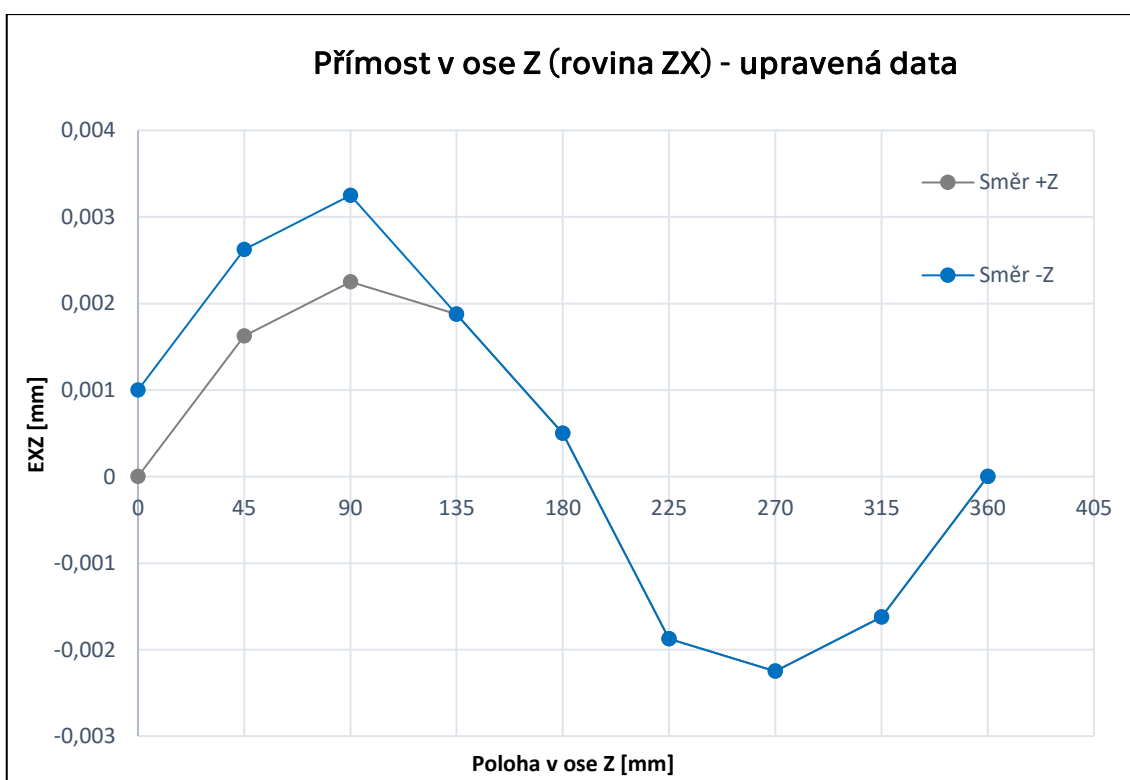
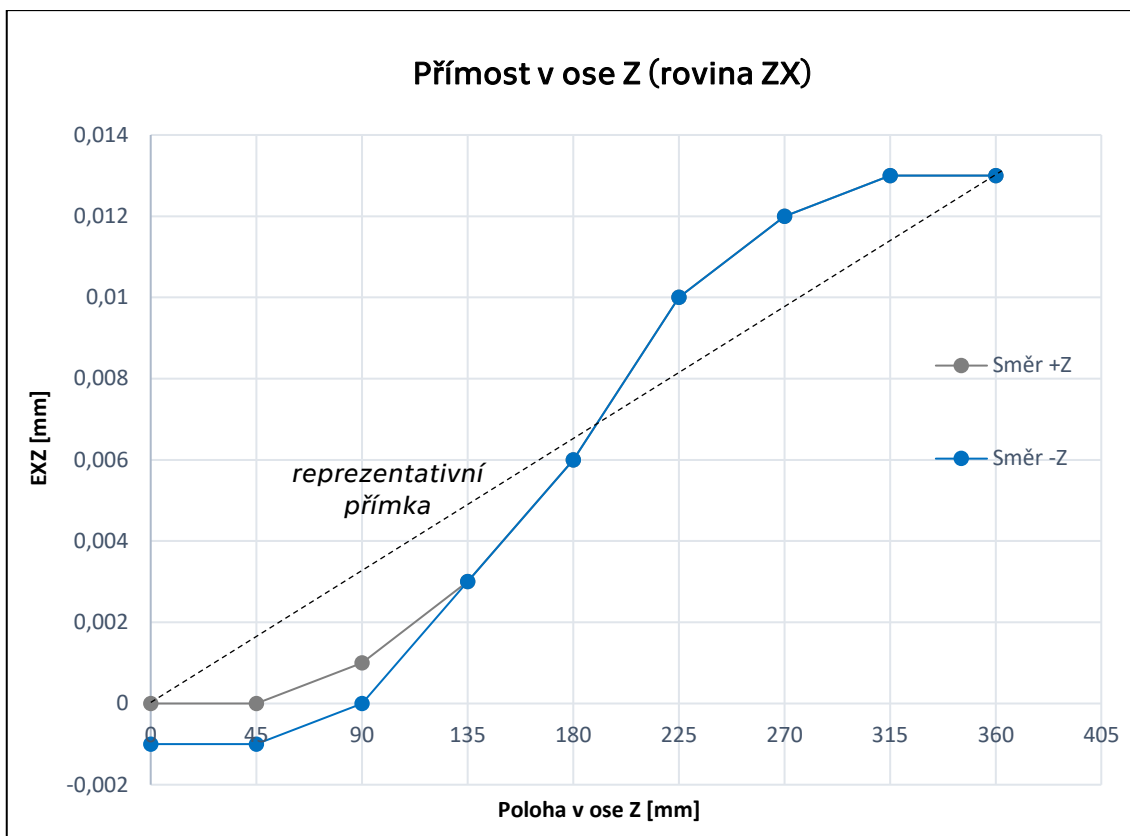


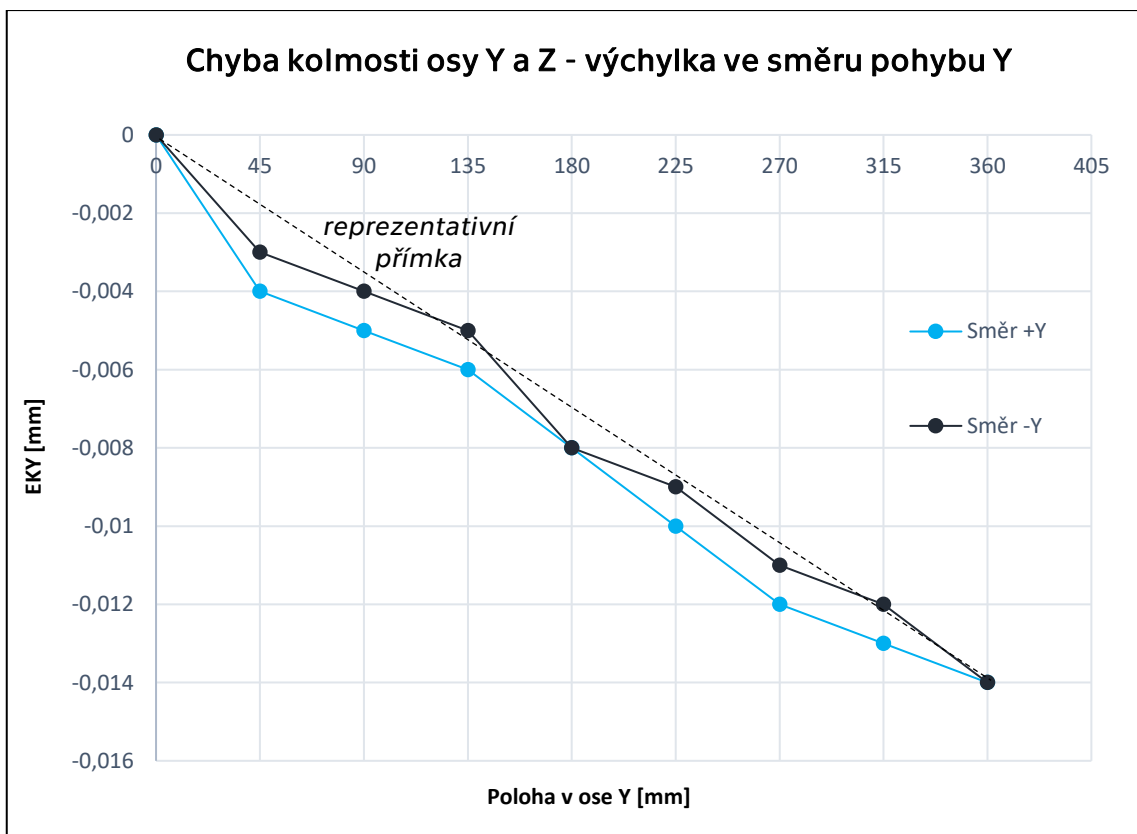
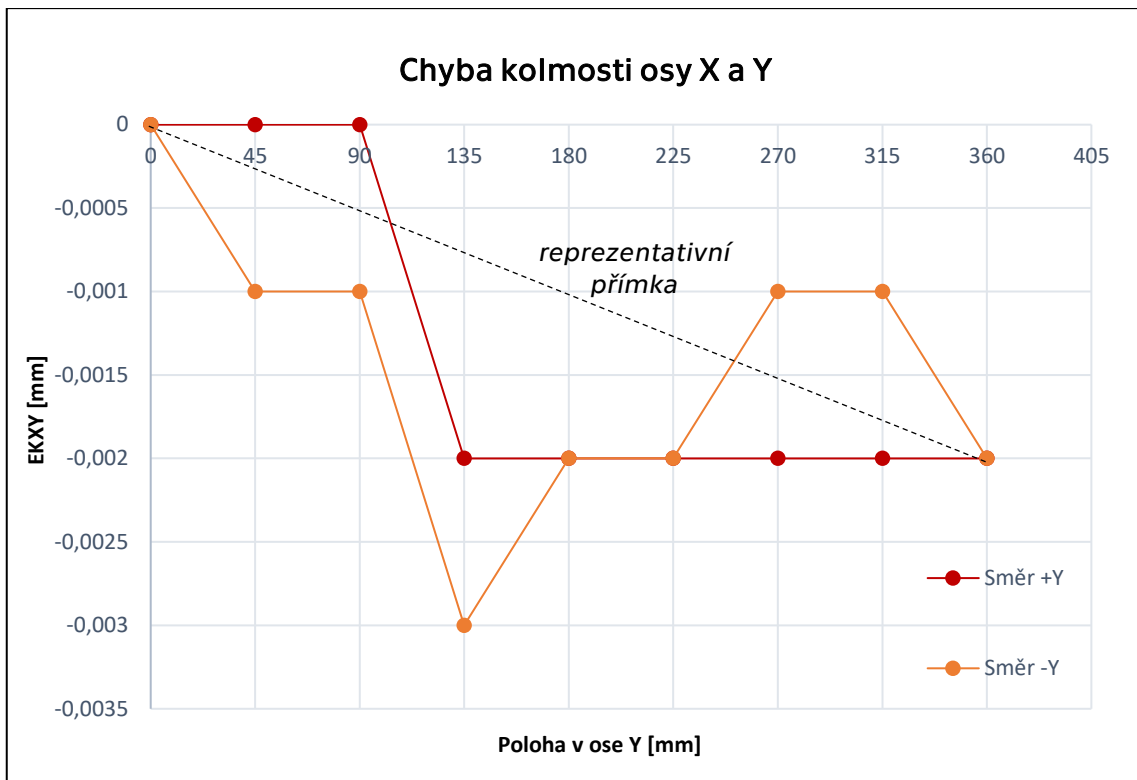


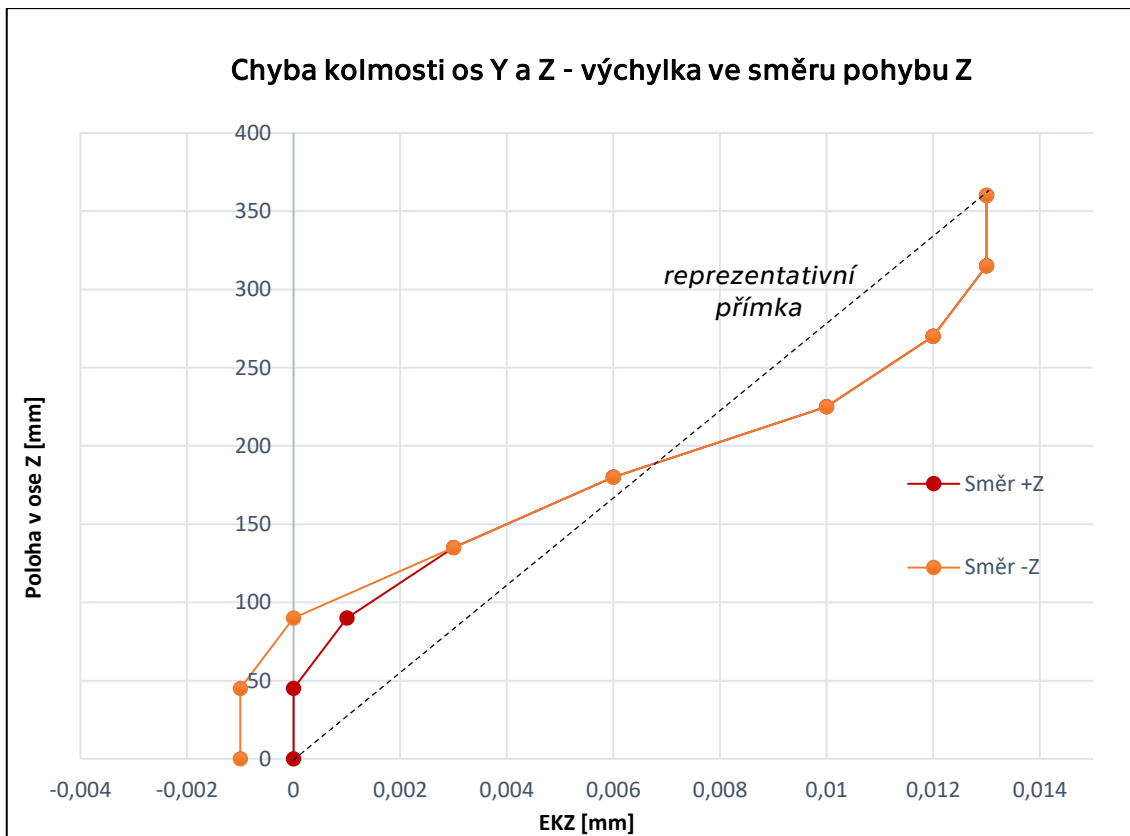




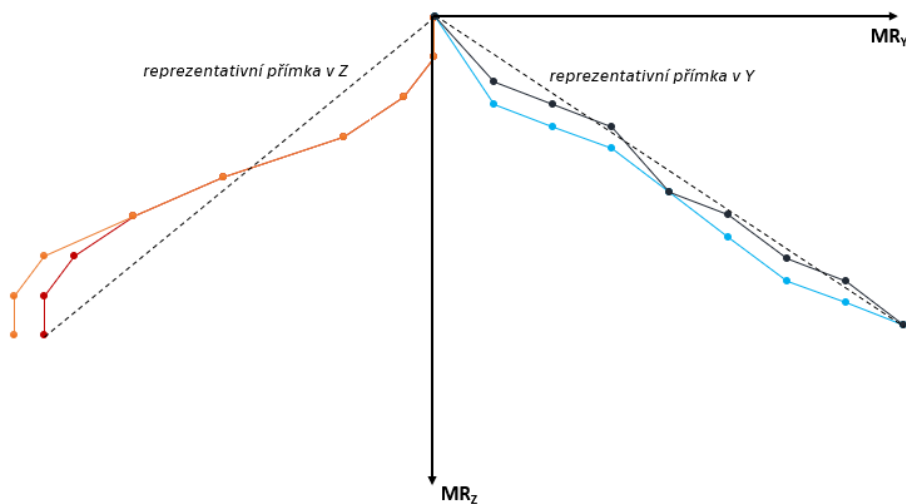


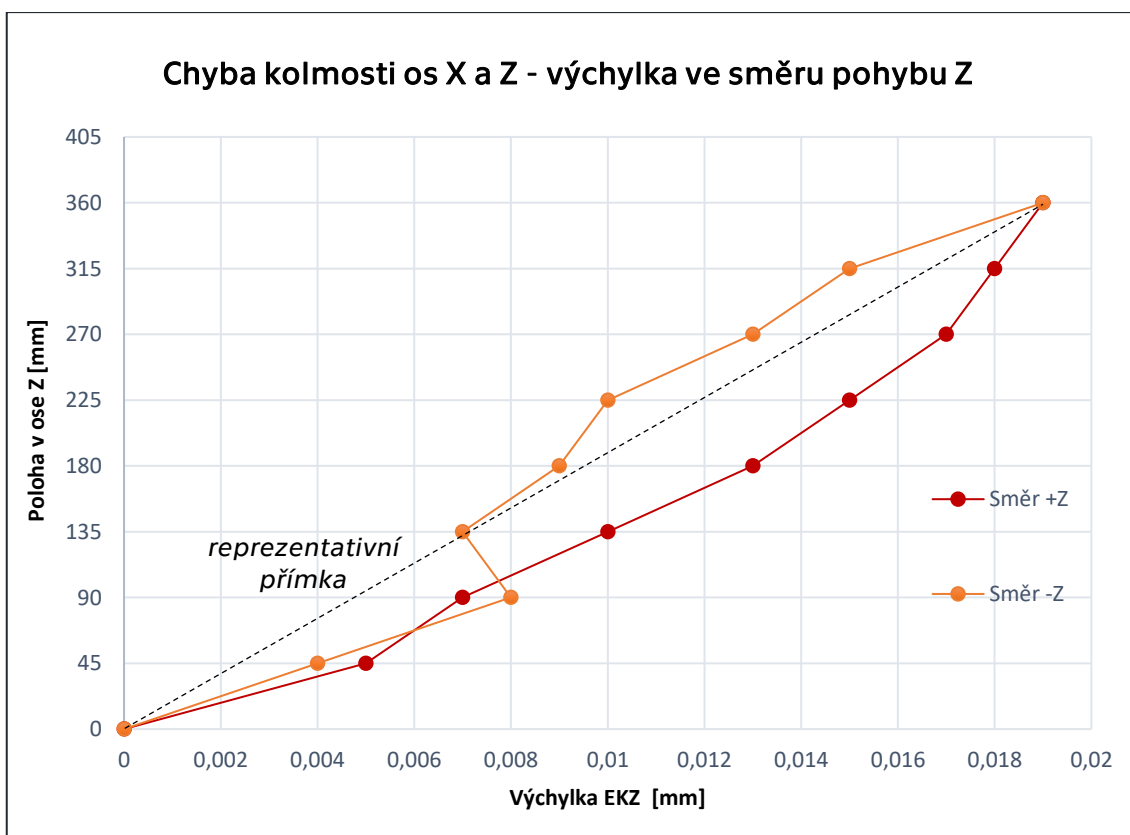
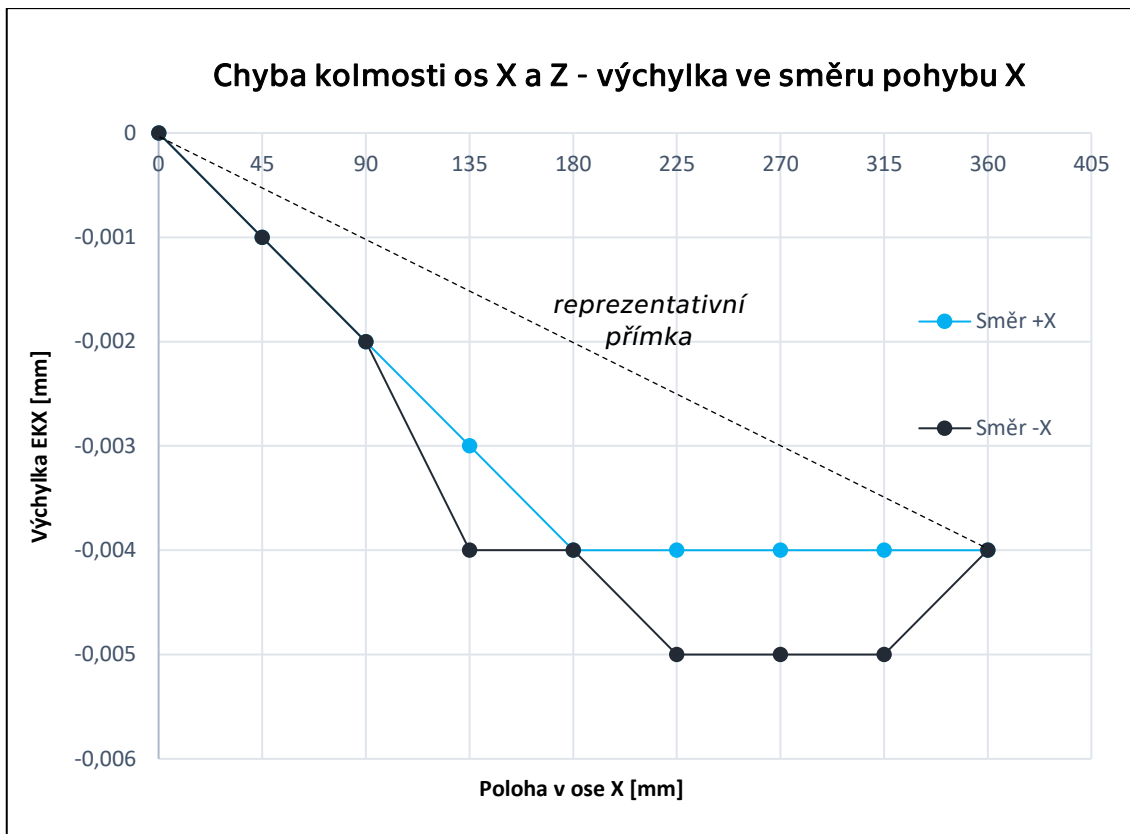




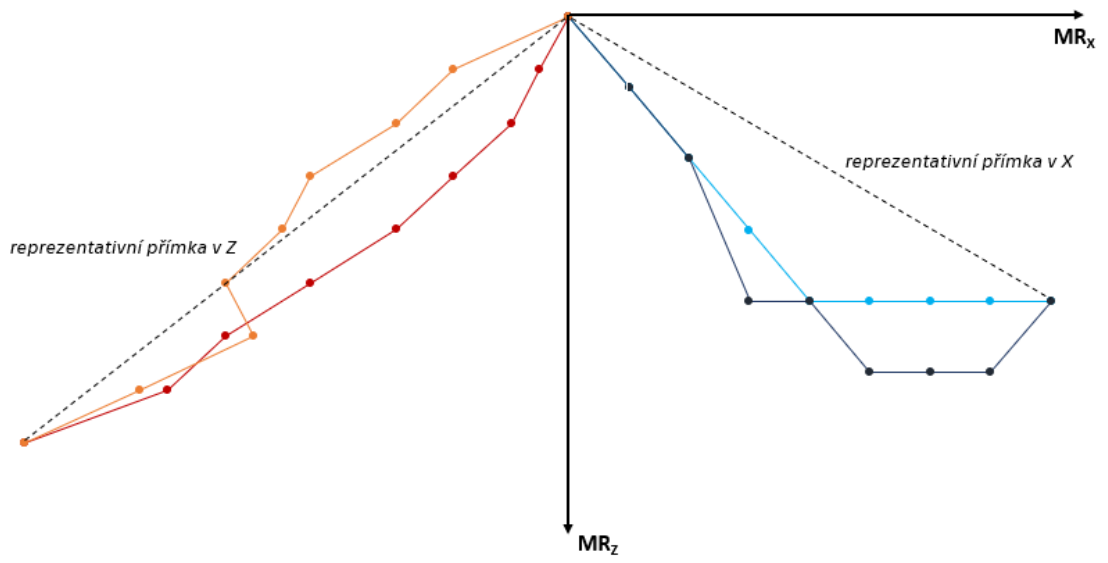


Kolmost reprezentativních přímek os Y a Z





Kolmost reprezentativních přímek os X a Z



Příloha 2: Grafický výstup ze softwaru Renishaw při měření polohování osy A

List XIII: Měření bez zátěže v levé polovině pracovního prostoru

List XIV: Měření bez zátěže v pravé polovině pracovního prostoru

List XV: Měření se zátěží v levé polovině pracovního prostoru

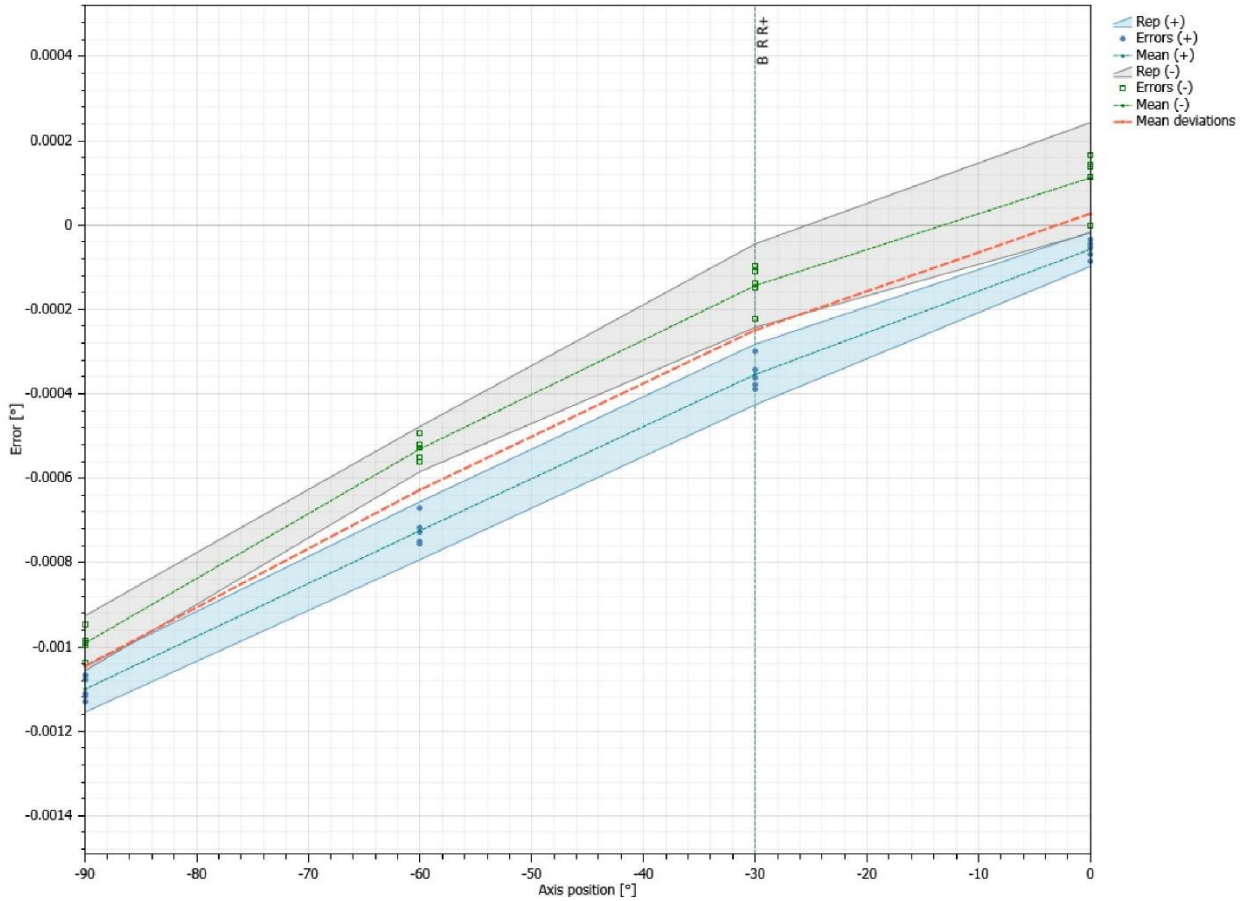
ISO 230-2 2006:Úhlový A

mer2 L MCU 700 A Rotary 20190702T1026.rta
Operator: karel.snajdr



Machine name	MCU 700	Serial number	103	Targets	4 Linear
Axis under test	A	Number of runs	5 Alternate bidir	Test date	2.7.2019 10:26:01
Test equipment		Serial number		Calibration date	
XL-80		72K744		12.11.2012	
XR20-W		937F24		15.6.2015	
XC-80		88U897		11.10.2012	

Accuracy And Repeatability



Úhlový A - Analysis features

Name	(+) °	(-) °	(Bidir) °
Accuracy (A)	0.00114	0.00130	0.00140
Repeatability (R)	0.00014	0.00026	0.00038
Sys dev (E)	0.00104	0.00110	0.00121

Úhlový A - Analysis features

Name	Value (°)
Reversal (B)	0.00021
Mean reversal	-0.00017
Mean deviation (M)	0.00107

Uncertainty notes:
Not tested

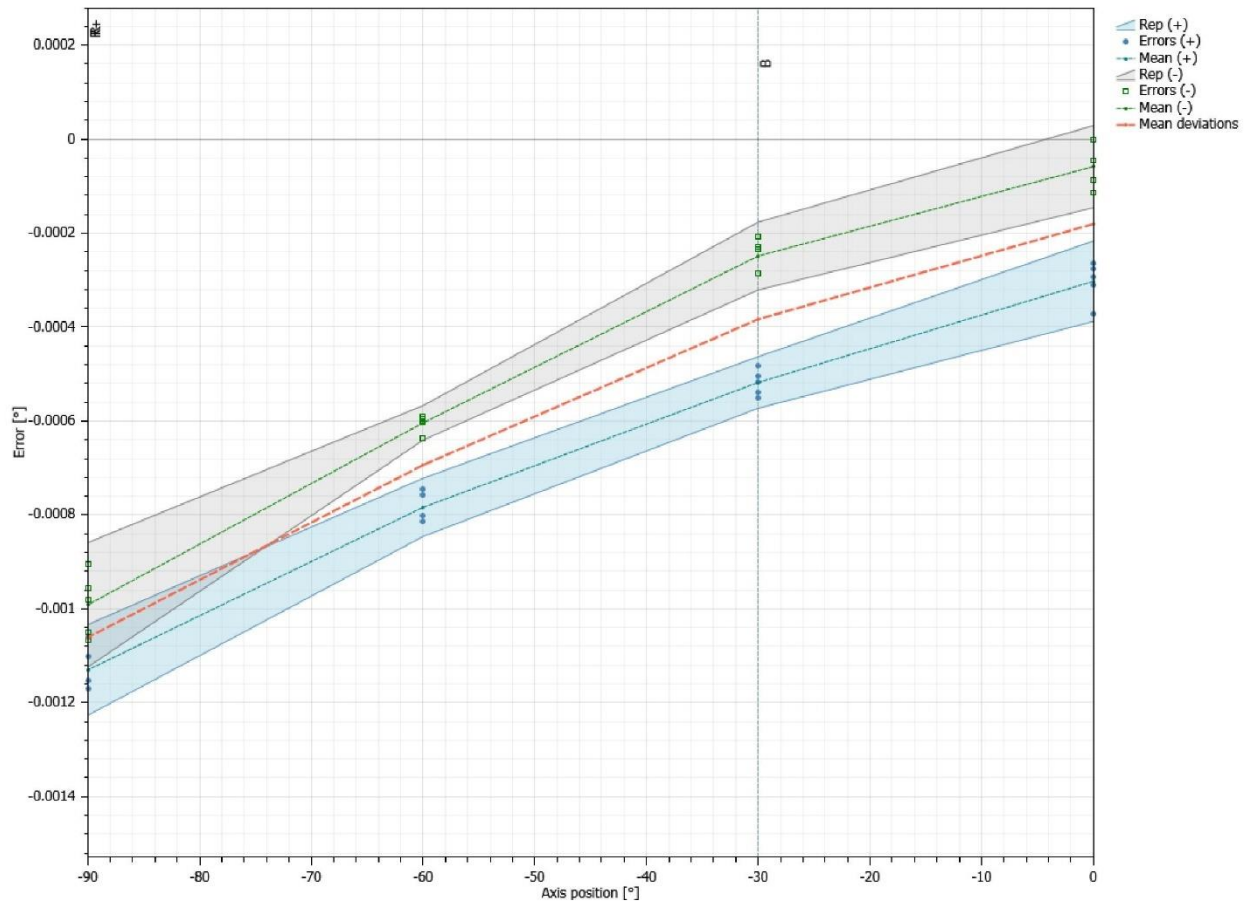
ISO 230-2 2006:Angular A

mer3 P MCU 700 A Rotary 20190702T1039.rta
Operator: karel.snajdr



Machine name	MCU 700	Serial number	103	Targets	4 Linear
Axis under test	A	Number of runs	5 Alternate bidir	Test date	2.7.2019 10:39:07
Test equipment		Serial number		Calibration date	
XL-80		72K744		12.11.2012	
XR20-W		937F24		15.6.2015	
XC-80		88U897		11.10.2012	

Accuracy And Repeatability



Angular A - Analysis features

Name	(+) °	(-) °	(Bidir) °
Accuracy (A)	0.00101	0.00115	0.00126
Repeatability (R)	0.00019	0.00026	0.00042
Sys dev (E)	0.00083	0.00093	0.00107

Angular A - Analysis features

Name	Value (°)
Reversal (B)	0.00027
Mean reversal	-0.00021
Mean deviation (M)	0.00088

Uncertainty notes:
Not tested

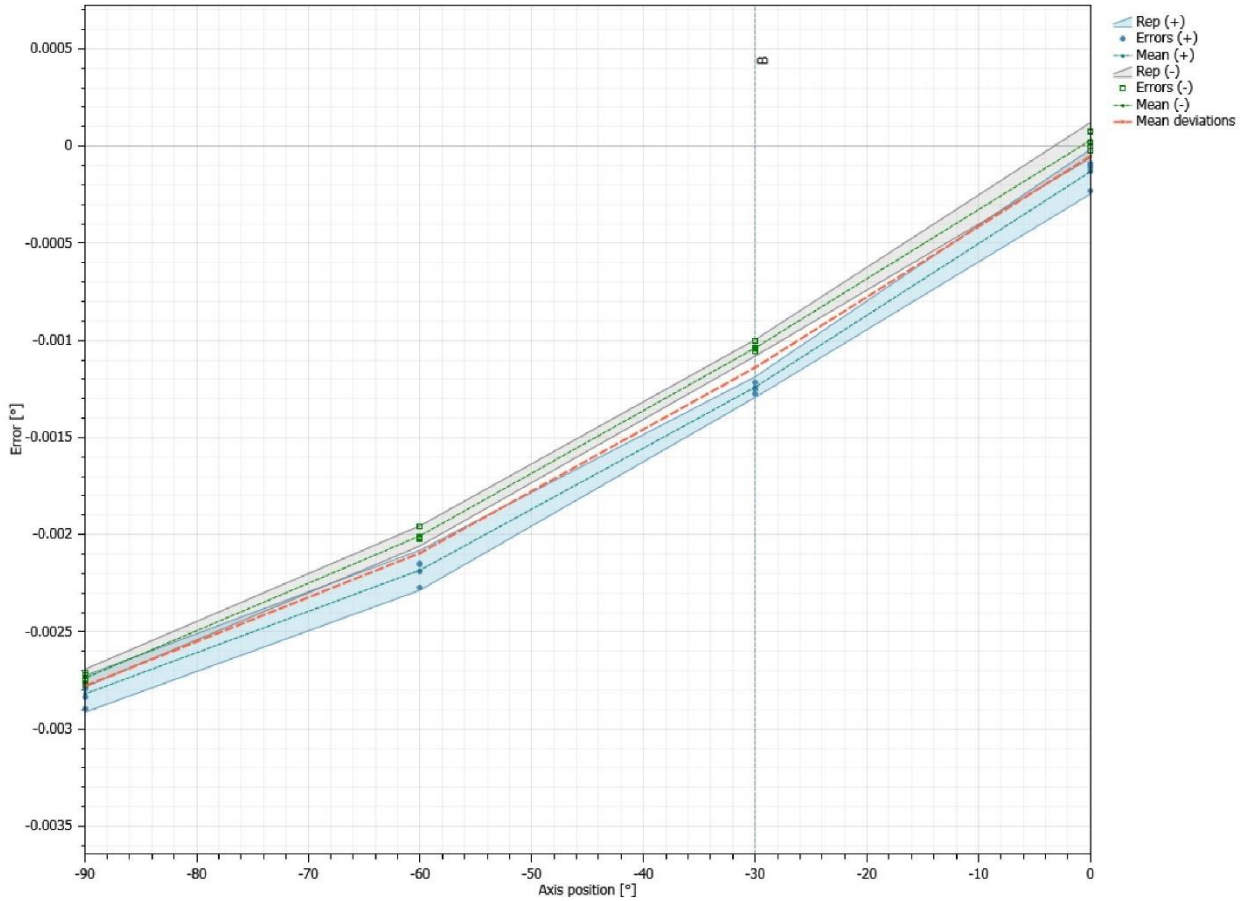
ISO 230-2 2006:Úhlový A

Mer1 zavazi L MCU 700 A Rotary 20190702T0957.rta
 Operator: karel.snajdr



Machine name	MCU 700	Serial number	103	Targets	4 Linear
Axis under test	A	Number of runs	5 Alternate bidir	Test date	2.7.2019 9:57:19
Test equipment		Serial number		Calibration date	
XL-80		72K744		12.11.2012	
XR20-W		937F24		15.6.2015	
XC-80		88U897		11.10.2012	

Accuracy And Repeatability



Úhlový A - Analysis features

Name	(+) °	(-) °	(Bidir) °
Accuracy (A)	0.00290	0.00290	0.00303
Repeatability (R)	0.00023	0.00018	0.00037
Sys dev (E)	0.00269	0.00277	0.00285

Úhlový A - Analysis features

Name	Value (")
Reversal (B)	0.00020
Mean reversal	-0.00016
Mean deviation (M)	0.00273

Uncertainty notes:
 Not tested

Příloha 3: Technické parametry stroje MCU 700 SPEED

Technická data // Dane techniczne

TECHNICKÁ DATA // DANE TECHNICZNE		MCU 700VT-5X Frézování / Soustružení Frezowanie / Toczenie	MCU 700V-5X Frézování / Frezowanie	
Lineární osy // Osie liniowe	Pojezd v ose X // Jazda w kierunku osi X	mm	700	
	Pojezd v ose Y // Jazda w kierunku osi Y	mm	820	
	Pojezd v ose Z // Jazda w kierunku osi Z	mm	550	
	Pracovních posuv v osách X,Y,Z // Posuwy robocze w osiach X,Y,Z	mm.min ⁻¹	1 - 60 000	
	Rychloposuv v osách X,Y,Z // Szybki posuv w osiach X,Y,Z	mm.min ⁻¹	60 000	
	Zrychlení v osách X,Y,Z // Przyspieszenie w osiach X,Y,Z	mm.s ⁻²	6 500	
	Programovatelný krok // Programowalny krok	mm	0,001	
Rotační osy // Osie obrotowe	Rozsah naklápění osy A // Zakres przechylenia osi A	°	150 (+30 / -120)	
	Rozsah otáčení osy C // Zakres obrotu osi C	°	neomezené // nieskończoność	
	Maximální otáčky osy A // Obroty maksymalne osi A	min ⁻¹	25	
	Maximální otáčky osy C // Obroty maksymalne osi C	min ⁻¹	500	100
	Přesnost dělení os A, C // Dokładność podziału osi A, C	°	0,001	
Pracovní stoly // Stoly robocze	Velikost upínací plochy stolu // Wielkość powierzchni do mocowania stolu	mm	Ø 630 Ø 800	Ø 630 Ø 800 □ 630
	Maximální průměr obrobku // Średnica maks. obrabianego przedmiotu	mm	Ø 1 000	
	Maximální výška obrobku // Wysokość maks. obrabianego przedmiotu	mm	500	
	Maximální zatížení stolu // Obciążenie maksymalne stolu	kg	850	
	Výška stolu nad podlahou // Wysokość stolu nad podłogą	mm	920	
Přesnost ČSN ISO 230-2 // Dokładność ČSN ISO 230-2	Přesnost stavění souřadnic // Dokładność ustawiania współrzędnych	mm	0,004	
	Přesnost najetí // Dokładność najechania	mm	0,007	
Přesnost VDI/DGQ3441 // Dokładność VDI/DGQ3441	Přesnost stavění souřadnic // Dokładność ustawiania współrzędnych	mm	0,004	
	Přesnost najetí // Dokładność najechania	mm	0,007	
Přesnost JIS B 6336 // Dokładność JIS B 6336	Vyhodnocení po dráze // Ocena po torze	mm	±0,003	
	Opakované najetí // Ponowne najechanie	mm	±0,002	
Energetická připojení a spotřeba // Podłączenie energetyczne i zużycie	Napětí AC // Napięcie AC		3 × 400V, 50Hz	
	Jmenovitý proud // Prąd znamionowy	A	150	
	Celkový příkon stroje // Ogólny pobór mocy	kVA	85	
	Doporučený přívod elektrovodů // Zalecane doprowadzenie prądu	mm ²	4 × 95 Cu	
	Pracovní tlak pneumatického zařízení // Ciśnienie robocze urządzenia pneumatycznego	MPa	0,6	
	Spotřeba tlakového vzduchu (min – max) // Zużycie sprężonego powietrza	m ³ /hod	8 - 20	
Rozměry strojů // Wymiary maszyn	Rozměry stroje (délka × šířka × výška) // Wymiary maszyny (długość × szerokość × wysokość)	mm	4 085 × 3 460 × 3 528	
	Přepravní rozměry stroje (délka × šířka × výška) // Wymiary gabarytowe maszyny (długość × szerokość × wysokość)	mm	4 085 × 2 400 × 2 950	
	Hmotnost stroje // Masa maszyny	kg	18 000	
	Hmotnost stroje včetně dopravníku třísek // Masa maszyny z přenošákem třísek	kg	18 450	
Rozměry stroje "PZ" // Wymiary maszyny "PZ"	Rozměry stroje (délka × šířka × výška) // Wymiary maszyny (długość x szerokość x wysokość)	mm	4 880 × 5 960 × 3 528	
	Přepravní rozměry stroje (délka × šířka × výška) // Wymiary gabarytowe maszyny (długość × szerokość × wysokość)	mm	4 085 × 2 400 × 2 950	
	Hmotnost stroje včetně paletového zakladače // Masa maszyny z nakładaczem palet	kg	19 000	
	Hmotnost stroje včetně PZ a dopravníku třísek // Masa maszyny z PZ i přenošákem třísek	kg	19 450	
Řídicí systém // System sterowania		Sinumerik 840D Heidenhain iTNC 640	Heidenhain iTNC 530 Sinumerik 840D	

Technická data vřeten a zásobníku //

Parametry techniczne wrzecion i magazynu narzędzi

Standard		POWER	SPEED	SPRINT	RAPID*
Typ pohonu // Typ napędu	-	integrovaný zintegrowany	integrovaný zintegrowany	integrovaný zintegrowany	integrovaný zintegrowany
Převodovka // Skrzynka biegów	-	ne // nie	ne // nie	ne // nie	ne // nie
Vřeteno pro soustružnické operace s hydraulickou brzdou // Wrzeciono do operacji tokarskich z hamulcem hydraulicznym	-	ne // nie	ano / ne // tak / nie	ano / ne // tak / nie	ano / ne* // tak / nie*
Kužel vřetene // Stožek wrzeciona	-	ISO 50	HSK-A63 (ISO 40)	HSK-A63	HSK-A63
Rozsah otáček // Zakres obrotów	min ⁻¹	20 – 10 000	20 – 12 000	20 – 18 000	20 – 24 000
Výkon pohonu vřetene S1/S6 (40%ED) // Moc napędu wrzeciona S1/S6 (40%ED)	kW	20 / 26	32 / 48	25 / 35	19 / 27
Krouticí moment S1/S6 (40%ED) // Moment skręcający S1/S6 (40%ED)	Nm	262 / 340	130 / 200	87 / 130	60 / 86
Jmenovité otáčky // Obroty znamionowe	min ⁻¹	800	2 000	2 800	3 600
Vzdálenost čela vřetena od otočné sklupného stolu (min - max) // Odległość czola wrzeciona od obrotowego stolu przechylného (min. – maks.)	mm	110 - 660	150 - 700	150 - 700	150 - 700
Vzdálenost čela vřetena od otočné sklupného stolu s paletovou výměnou min - max) // Odległość czola wrzeciona od obrotowego stolu przechylného z výměnou palet (min. – maks.)	mm	35 - 585	75 – 625	75 - 625	75 - 625
Způsob výměny nástrojů // Sposób wymiany narzędzi	-	napichovací // nakłuwanie			
Nástrojový držák // Uchwyt narzędziowy	-	ISO 7388/1 50	DIN 69893 (ISO 7388/1 40)	DIN 69893	DIN 69893
Maximální počet nástrojů // Maksymalna ilość narzędzi	-	24 / 48	32/64 (24/48)	32 / 64	32 / 64
Maximální průměr nástroje // Maksymalna średnica narzędzia	mm	130	80 / 130 (130)	80 / 130	80 / 130
Maximální délka nástroje // Maksymalna długość narzędzia	mm	265	320 (265)	320	320
Max. hmotnost nástroje // Maksymalna masa narzędzia	kg	10	10	10	10
Čas výměny nástroj – nástroj / tříska – tříška // Czas wymiany narzędzie – narzędzie / wiór – wiór	s	3 / 7	3 / 7	3 / 7	3 / 7

Rozměry stroje // Wymiary maszyny

