



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

MĚŘENÍ PŘESNOSTI POLOHOVÁNÍ LINEÁRNÍCH OS OBRÁBĚCÍCH STROJŮ POMOCÍ INTERFEROMETRU

LINEAR AXIS ACCURACY MEASUREMENT OF MACHINE TOOLS WITH A LASER
TRACKER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

FRANTIŠEK ŽŮREK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JOSEF KNOBLOCH, MSc

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): František Žůrek

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Měření přesnosti polohování lineárních os obráběcích strojů pomocí interferometru

v anglickém jazyce:

Linear axis accuracy measurement of machine tools with a Laser Tracker

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je provést rešerši v oblasti měření přesnosti polohování lineárních os a provést a vyhodnotit měření interferometrem na stroji.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše v oblasti měření přesnosti polohování
- měření lineární osy na stroji pomocí interferometru RENISHAW
- statistické zpracování a vyhodnocení naměřených dat

Seznam odborné literatury:

-WECK, Manfred, BRECHER, Christian. Werkzeugmaschinen 5: Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität. 2006. überarb. Auflage. Verlag Berlin Heidelberg : Springer, 2006. 701 s. ISBN 978-3-642-38748-7.

-<http://www.renishaw.com/>

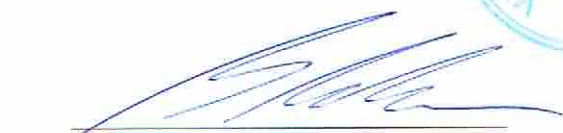
-www.infozdroje.cz

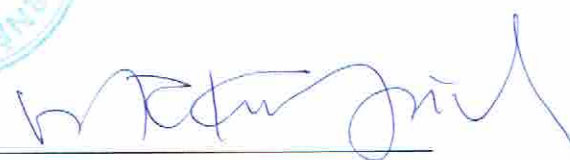
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Knobloch, MSc


Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 20.11.2013




doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 5
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá rešerší v oblasti měření přesnosti polohování číslíkově řízených strojů a následném lineárním měření stroje MCV 754 QUICK pomocí interferometru RENISHAW XL-80.

Cílem je naměření tří chybových parametrů ve všech osách stroje a vyhodnocení metody spolu s porovnáním jednotlivých měření.

Klíčová slova

ČSN ISO 230-2, laserový interferometr, měření přesnosti a opakovatelnosti polohování.


Abstract

This bachelor thesis contains research in the field of machine tools positioning accuracy followed by linear measurements of MCV 754 QUICK machine with a laser-interferometric system RENISHAW XL-80.

The aim is to get three positioning errors in each axis of the machine, evaluate the measuring method and compare different measurements that are going to be performed.

Keywords

CSN ISO 230-2 standard, laser interferometer, positioning accuracy and repeatability measurement

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 6
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Bibliografická citace

ŽŮREK, F. *Měření přesnosti polohování lineárních os obráběcích strojů pomocí interferometru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Knobloch, MSc




Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „*Měření přesnosti polohování lineárních os obráběcích strojů pomocí interferometru*“ vypracoval samostatně, pod vedením svého vedoucího, na základě konzultací a s použitím uvedené literatury.

V Brně dne 28. 5. 2014

František Žůrek

.....

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 8
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Poděkování

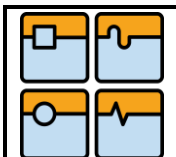
Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce, Ing. Josefu Knoblochovi, MSc, za odborné vedení a nesmírnou ochotu při vypracování bakalářské práce a praktickém měření.

V neposlední řadě patří velký dík rodičům a nejbližším za podporu během celé doby studia.



Obsah

1	Úvod.....	10
2	Přesnost polohování obráběcích strojů	11
2.1	Definice přesnosti polohování.....	11
2.2	Normy v oblasti měření přesnosti polohování	12
2.3	Způsoby měření přesnosti polohování	14
2.3.1	Měření přesnosti polohování podle postupu a průběhu zkoušky	14
2.3.1.1	Lineární měření	14
2.3.1.2	Diagonální testy.....	15
2.3.1.3	Krokové diagonální testy.....	17
2.3.2	Měření přesnosti polohování podle měřicího zařízení	19
2.3.2.1	Měření založena na Dopplerově jevu (LDDM)	19
2.3.2.2	Měření laserovým interferometrem	20
2.3.2.3	Laser Trackery a Laser Tracery	21
2.3.2.4	Porovnání parametrů jednotlivých zařízení	22
3	Měření přesnosti polohování	23
3.1	Měřený stroj a jeho příprava	23
3.2	Laserový interferometrický systém Renishaw XL-80	25
3.2.1	Zapojení měřicího systému a zapojení optiky.....	27
3.2.2	Upevnění optiky a vyrovnání laseru	28
3.2.3	Prostředí software pro zaznamenávání dat	33
3.3	Zkušební podmínky při jednotlivých měřeních	35
4	Výsledky a vyhodnocení měření.....	36
4.1	Naměřené výsledky dle ISO 230-2	37
4.2	Porovnání jednotlivých měření.....	38
4.2.1	Vliv teploty.....	40
4.2.2	Vliv počtu měřících bodů.....	43
4.2.3	Vliv posuvové rychlosti.....	44
5	Závěr	47
6	Seznamy	48
6.1	Seznam obrázků.....	48
6.2	Seznam tabulek.....	49
6.3	Seznam rovnic.....	49
6.4	Seznam příloh	49
6.5	Seznam použité literatury.....	50

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 10
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

1 Úvod

Kvalitu a tím i cenu obráběcího stroje ovlivňuje řada jeho vlastností, přičemž požadavkem zákazníků a tudíž i snahou výrobců obráběcích strojů je zvyšování výkonu za současného zachování, či nejlépe zvýšení pracovní přesnosti zařízení. S nástupem číslicového řízení v padesátých letech 20. století dochází všeobecně v oblasti technologií strojního obrábění k přirozeně větším nárokům na pracovní přesnost těchto strojů v řádech tisíců milimetrů. Takto přesná obráběcí centra vyžadují větší nároky při samotném návrhu, konstrukci, údržbě strojů a zvyšují důraz na diagnostiku a testování těchto zařízení. [1]

Již ve 30. letech minulého století zavedl německý profesor Georg Schlesinger jednotný systém posuzování přesnosti obráběcích strojů. Vytvořil směrnice k používání nástrojů, přístrojů a přípravků za účelem zjišťování přesnosti obráběcích strojů. Specifikoval standardní jednoduché postupy měření, včetně vymezení povolených tolerancí úchylek. Takto zavedená praxe, doplněná o další metody a používané přístroje, přetrvává dodnes. Každý výrobní stroj musí být před předáním zákazníkovi řádně zkontrolován. Rozsah a provedení zkoušek a jednotlivé metody jsou stanoveny normou, případně na domluvě mezi samotným zákazníkem a výrobcem. Vymezení některých standardních způsobů zkoušení udávají normy ČSN ISO 230-1 až ČSN ISO 230-8. [1]

Mezi nejdůležitější metody zkoušení současných obráběcích strojů patří zkoušky Geometrické přesnosti (ČSN ISO 230-1) a Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavování polohy v číslicově řízených osách (ČSN ISO 230-2).[1]

Tato bakalářská práce se zabývá popisem současného stavu poznání a rešerší norem právě v oblasti stanovování přesnosti a opakovatelnosti nastavování polohy. Dále také praktickým měřením lineární osy obráběcího centra MCV 754 QUICK, kterým disponuje Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky FSI VUT v Brně, pomocí laserového interferometru RENISHAW (systém XL-80) a vyhodnocením výsledků tohoto měření a metody porovnáním jednotlivých měření.

Závěry a naměřené výsledky poslouží k vytvoření matematického popisu stroje ve spolupráci s Ústavem Matematiky FSI VUT v Brně. Tento matematický model nám může napovědět více o vlastnostech stroje a jeho chování, jež jsou v praxi často obtížně předvídatelné a záležitostí zejména zkušeností a empirie.



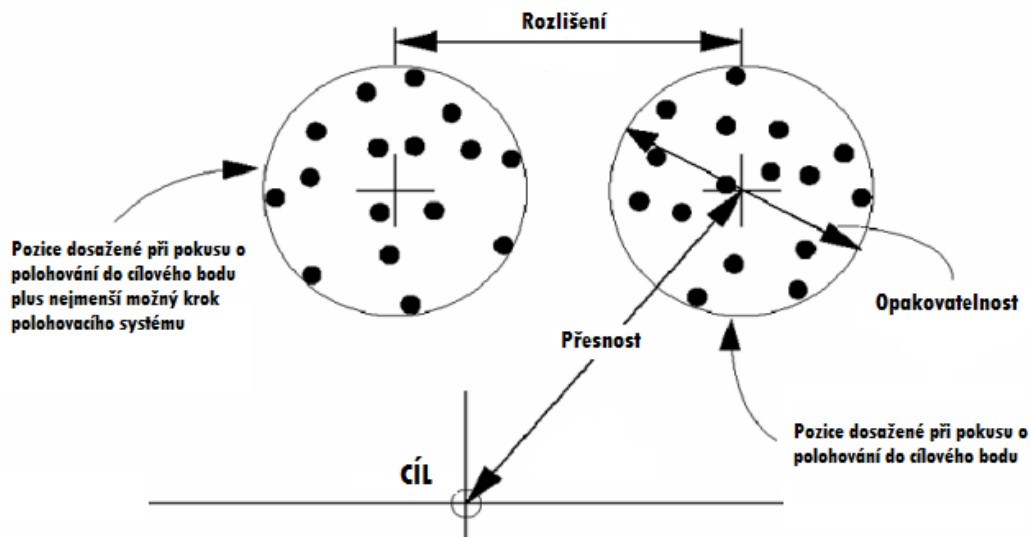
2 Přesnost polohování obráběcích strojů

2.1 Definice přesnosti polohování

Přesnost a opakovatelnost nastavování polohy jsou klíčovými parametry obráběcího stroje a v mnohém udávají předpokládanou kvalitu a výkon stroje. Tyto pojmy můžeme definovat následovně:

- *přesnost* nastavování polohy nástroje,
- *opakovatelnost* nastavování polohy nástroje,
- *rozlišení* nastavování polohy nástroje. [2],[3]

Tyto je možné názorně vysvětlit a porovnat na příkladu terče střelce Obr. 2.1.



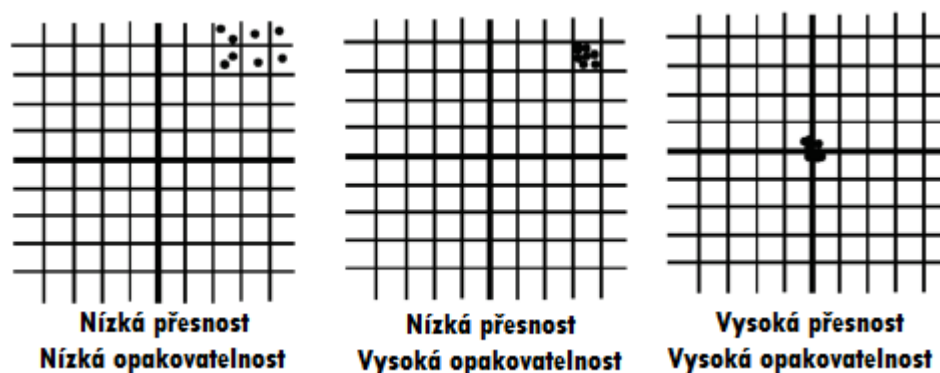
Obr. 2.1: Vysvětlení pojmů v oblasti přesnosti polohování [2]

Přesnost je schopnost říkat pravdu. Je to chyba při translačním či rotačním polohování mezi libovolnými dvěma body v pracovním rozsahu stroje. Jak ukazuje Obr 2.1, je možné ji vyjádřit jako rozdíl vzdálenosti efektivní hodnoty poloměrů všech nastřílených hodnot a poloměru středu střelcová terče. [2]

Opakovatelnost je schopnost říkat pokaždé pravdivý příběh (tu stejnou pravdu) stále dokola. Je to schopnost polohovat nástroj vždy do stejné polohy při každém novém najetí. Dle Obr 2.1 může být opakovatelnost vyjádřena jako průměr kružnice opsané kolem všech nastřílených hodnot, respektive obsahující i hodnotu nejvíce vzdálenou od středu. [2]

Rozlišení vyjadřuje, jak detailní váš příběh je. Je to nejmenší krok, kterého je polohovací mechanismus stroje schopen dosáhnout během pohybu z bodu do bodu. Rozlišení polohovacího systému definuje nejmenší opakovatelnost, které je tento systém schopen dosáhnout. [2]

Definováním a shrnutím těchto základních metrologických pojmů jsme schopni hodnotit kvalitu polohovacího systému stroje, viz Obr. 2.2.



Obr. 2.2: Srovnání opakovatelnosti a přesnosti polohovacího systému [4]

2.2 Normy v oblasti měření přesnosti polohování

Existuje několik norem a standardů, které udávají, jakým způsobem provádět proces stanovování přesnosti polohování stroje a definují klíčové měřené parametry.[5] Tím pádem se jednotlivé normy v podstatě liší v definici přesnosti polohování a dle různých norem musíme postupovat při měření jiným způsobem. Tab. 2.1 shrnuje seznam nejdůležitějších norem, zabývajících se přesností polohování a jednotlivé standardy stručně popisuje.

Tab. 2.1: Souhrn norem zabývajících se přesností polohování [5]

Země působnosti	Označení normy	Popis
Mezinárodní	ISO 230-2: 2006	Specifikuje metody testování a vyhodnocování přesnosti a opakovatelnosti polohování číslíkově řízených obráběcích strojů přímým odměřováním nezávislých os na stroji. Používá se například pro typové, přejímací a porovnávací zkoušky, údržbu a kompenzaci strojů.
Německo	VDI/DQG 3441	Popisuje aplikaci statistických metod ke zjišťování přesnosti polohování stroje. Norma má dvě části, první se zaměřuje na provozní nepřesnosti, tyto jsou měřeny zjišťováním, jak přesně je stroj schopen vyrobit zadanou součást. Druhá část popisuje zjišťování přesnosti polohování přímým délkovým měřením, tedy v nezátíženém stavu.
Severní Amerika	ASME B5.54-2005	Rozsáhlá norma popisující metodiku určování geometrických parametrů stroje, přesnost polohování a opakovatelnost. Obsahuje také informace zahrnující okolní podmínky a teplotní nejistoty. Část popisující měření přesnosti polohování je v přístupu velmi podobná ISO 230-2:2006, obsahuje však také část zabývající se periodickými chybami.
Japonsko	JIS B 6330-1980	Vymezuje metody určování přesnosti polohování a opakovatelnosti obráběcích strojů.



V našich podmínkách se k měření a diagnostice strojů nejčastěji používá postupů dle mezinárodních standardů ISO 230, případně německé VDI. V Tab. 2.2 uvedme jako příklad některé klíčové parametry, doporučené pro vyhodnocování zkoušky přesnosti polohování při použití normy ISO 230-2 a jejich ekvivalent německé VDI/DQG 3441.

Nejprve však zároveň definujme některé další základní údaje z těchto norem, které jsou potřeba k výpočtu těchto klíčových parametrů. [5],[6]

$\bar{x}_i \uparrow$; ISO 230-2 ; průměrná jednostranná polohová úchylka v poloze.

$s_i \uparrow$; ISO 230-2 ; odhad jednostranné standardní nejistoty nastavení polohy v ose.

\bar{x}_j ; VDI/DQG 3441; systémová odchylka od požadované hodnoty v cílové poloze.

\bar{s}_j ; VDI/DQG 3441; průměrná standardní odchylka v cílové poloze.

Tab. 2.2: Porovnání klíčových parametrů norem ISO 230-2 a VDI/DQG 3341 [5]

ISO 230-2: 2006	VDI/DQG 3441	Porovnání
<p>Necitlivost v ose (reversal value of an axis)</p> $B = \max[B_i]$ <p>Kde $B_i = \bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow$</p>	<p>Necitlivost v dané poloze (max reversal error at a position)</p> $U_{max} = [U_j]$ <p>Kde $U_j = \bar{x}_j \downarrow - \bar{x}_j \uparrow$</p>	<p>Stejně maximální necitlivost v ose</p>
<p>Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze (bidirectional repeatability of positioning at a position)</p> $R \uparrow = \max[4s_i \uparrow]$ <p>nebo</p> $R \downarrow = \max[4s_i \downarrow]$	<p>Maximální rozptyl polohy (max positional scatter)</p> $P_{s \max} = P_{s_j \max} = \max[6\bar{s}_j]$	<p>Podobné udává maximální odchylku při nastavování polohy v jednotlivých bodech. $P_{s \max}$ bude vždy větší než R jelikož udává trojnásobnou, nikoli dvojnásobnou standardní úchylku.</p>
<p>Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose (bidirectional accuracy of positioning of an axis)</p> $A = \max[\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow]$ $- \min[\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow]$	<p>Nejistota polohy (positional uncertainty)</p> $P = \left[\bar{x}_j + \frac{1}{2}(U_j + P_{s_j}) \right]_{Max}$ $- \left[\bar{x}_j - \frac{1}{2}(U_j + P_{s_j}) \right]_{Min}$	<p>Podobné maximální rozsah hodnoty založený na průměru polohových chyb, korespondujících standardních odchylek a nejistot polohy podél osy. Stejně jako v předchozím případě bude ze stejného důvodu německá hodnota P vždy větší než mezinárodní A.</p>

2.3 Způsoby měření přesnosti polohování

2.3.1 Měření přesnosti polohování podle postupu a průběhu zkoušky

Při výběru metody zkoušení a měření přesnosti polohování stroje vycházíme zejména z norem ČSN ISO 230 či VDI/DQG 3441. Přesností polohování se zabývají části normy ČSN 230-2 a ČSN 230-6, Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslíkové řízených osách, respektive Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách pracovního prostoru. První z těchto norem se zabývá měřením lineárním, v jedné ose, druhá z variant popisuje měření v celém pracovním prostoru stroje, nazývané také jako měření tzv. volumetrické přesnosti.

2.3.1.1 Lineární měření

Tento způsob měření je standardním způsobem zkoušení, údržby a kalibrace obráběcích strojů. Jak již uvedeno výše, vychází z ČSN ISO 230-2. [6] Tato norma popisuje metodiku měření, definuje klíčové pojmy a terminologii a specifikuje podmínky zkoušení jako měřicí podmínky, podobu zkušebnímu programu aj.

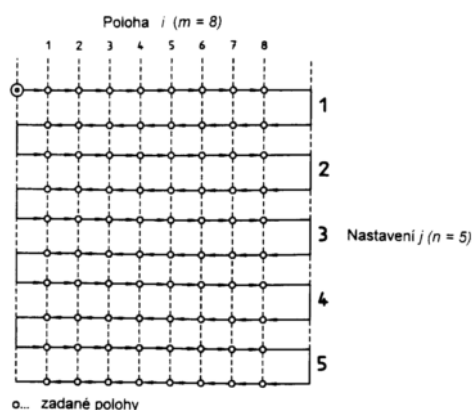
V první části tato norma formuluje samotný předmět normy a dále vymezuje termíny jako rozsah dráhy, zadaná měřená a skutečná poloha, necitlivost aj. [6]

Dále norma vymezuje vhodné zkušební podmínky, jako stav zkoušeného stroje, měřicí prostředí a ohřátí. Veškeré údaje a parametry zkoušky je příhodné zaznamenat do měřicího protokolu.

Pokud můžeme volit zadané polohy stroje zcela libovolně, norma uvádí vzorec

$$P_i = (i - 1)p + r , \quad (2.1)$$

kde i je číslo polohy, p je interval, který zajišťuje rovnoměrné zvolení poloh v měřeném rozsahu a r je koeficient zajišťující nerovnoměrnost rozložení zadaných poloh, abychom minimalizovali případné periodické chyby způsobené například stoupáním kuličkového šroubu, roztečí rysek měřítka aj. V osách do 2000 mm musí být zvoleno nejméně pět poloh celkově a nejméně pět poloh na metr v souladu s tímto vzorcem pro zkušební program. [6]



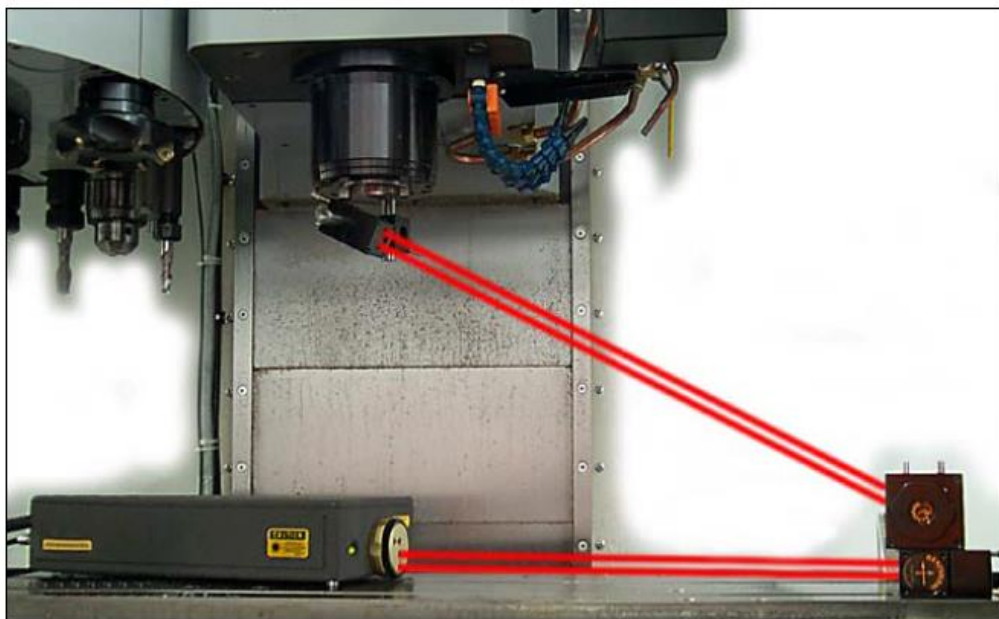
Obr. 2.3: Standardní zkušební cyklus dle ČSN 230-2 [6]



Upřednostňuje se grafická interpretace a vyjádření dosažených výsledků, přičemž k měřicímu protokolu se připojí údaje dle článku 7 normy, které upřesňují průběh měření. Jsou to například: poloha měřicího zařízení, datum měření, název stroje, polohy snímačů teploty, seznam veškerých použitých přístrojů, teplota prostředí na začátku a na konci měření, tlak a vlhkost vzduchu aj. [6]

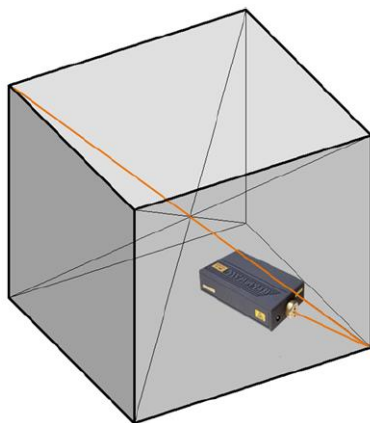
2.3.1.2 Diagonální testy

Kromě lineárního měření v každé ose zvlášť definuje norma ČSN ISO 230, konkrétně její část 6, měření přesností polohování v celém pracovním prostoru, které bývá nazýváno též jako měření volumetrické přesnosti stroje.

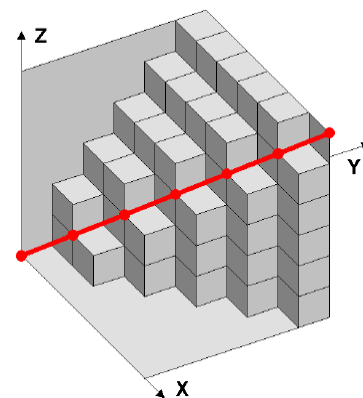


Obr. 2.4: Sestavení měřicího systému pro diagonální test dle ČSN ISO 230-6 [7]

Reflektor měřicího systému je připevněn na vřeteno stroje a postupně polohován do všech čtyř nejvzdálenějších diagonál. Podél každé úhlopříčky je v programu nadefinováno několik zkušebních poloh, ve kterých se měří odchylka od přesné polohy.



Obr. 2.5: Trajektorie paprsku laseru při diagonálním testu [7]



Obr. 2.6: Měřicí body diagonálního testu [7]

Tato metoda se jeví jako výhodnou a rychlou metodou, pomocí níž jsme schopni změřit přesnost v celém pracovním prostoru stroje efektivně a rychle. Studie společnosti Renishaw [7],[8] však upozorňuje na vznik možných nepřesností, kterou přináší takto programované polohování stroje.

Hlavní slabinu diagonálních testů popisuje tato studie následujícím příkladem. Představme si jednoduchý polohovací 2D systém, bez jakékoli chyby v nastavování polohy. V osách X i Y měří vzdálenost pracovního prostoru přesně 1000 mm. Poté je délka obou diagonál dle Pythagorovy věty:

$$\sqrt{1000^2 + 1000^2} = 1414,2136 \text{ mm}$$

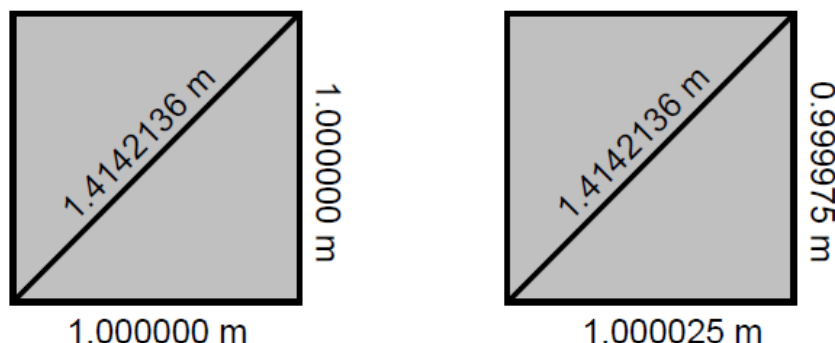
Nyní si představme, že polohovací systém vykazuje nepřesnost polohování v obou osách a v ose X přejíždí o 25 μ m/m, respektive v ose Y nedojíždí o stejnou hodnotu. Taková chyba je při polohování v podobných délkách naprosto běžnou záležitostí. Poté opět dle Pythagorase.

$$\sqrt{1000,025^2 + 999,9975^2} = 1414,2136 \text{ mm}$$

Porovnáním obou hodnot si lze všimnout:

Diagonála při ideálním polohování ve 2D systému = 1414,2136 mm.

Diagonála při nedokonalém polohování ve 2D systému = 1414,2136 mm.



Obr. 2.7: Porovnání ideálního a nedokonalého polohování ve 2D [7]

V obou případech se tedy délky úhlopříček rovnají, přestože v druhém případě je chyba v ose X i Y 25 mikronů. Tento případ však zdaleka není ojedinělým či zvláštním z důvodu uvažování dvojrozměrného polohování. Pokud bude kterákoliv osa (či více os) vykazovat nedojíždění do zadané polohy zatímco jiná osa (více os) bude vykazovat přejíždění, výsledná chyba polohování se do určité míry vyruší. Následující Tab. 2.3 ukazuje příklad odměřených přesností polohování u tří v zásadě identických strojů s jinou hodnotou nepřesností polohování v jednotlivých osách a zároveň naměřené hodnoty při diagonálním testu a naměřenou volumetrickou přesnost. Ta je definována jako délka největšího vektoru chyby mezi požadovanou a skutečnou polohou stroje měřená kdekoli v pracovním prostoru stroje.



Tab. 2.3: Příklad srovnání jednotlivých měření ve 3D [7]

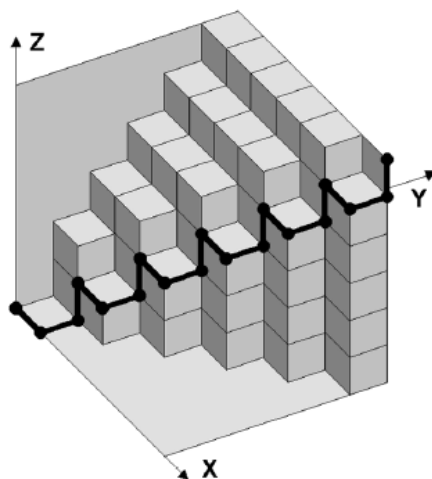
	Stroj A	Stroj B	Stroj C
Lineární odchylka v ose X ($\mu\text{m}/\text{m}$)	50	50	100
Lineární odchylka v ose Y ($\mu\text{m}/\text{m}$)	50	0	-50
Lineární odchylka v ose Z ($\mu\text{m}/\text{m}$)	-100	0	-25
Diagonální test (μm)	0	29	14
Volumetrická přesnost (μm)	122	50	115

Výsledky studie [7] jasně naznačují, že diagonální testy nemusí poskytovat spolehlivé odhady volumetrické přesnosti polohování. Jsou velmi citlivé na dílčí chyby a všechny odchylky v jednotlivých osách mohou společně výrazně zkreslit výsledné hodnoty.

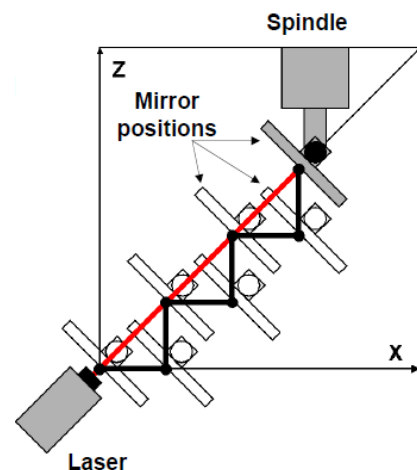
Pro spolehlivější a přesnější diagnostiku stroje by proto měla tato metoda měření být vždy doprovázena dalšími testy, jako zkouškou kruhové interpolace pomocí ballbaru, měřením přímosti, či právě klasickým lineárním měřením přesnosti polohování v jednotlivých osách stroje zvlášť. [7]

2.3.1.3 Krokové diagonální testy

V některých vědeckých publikacích [9], [10] byla navržena modifikace diagonálních testů změnou dráhy reflektoru laserového paprsku použitím speciální krokové sekvence k polohování do konkrétní diagonály stroje. Tato metoda je nazývána jako krokový diagonální test (*step diagonal test*), či vektorová metoda (*vector measurement technique*). Místo simultánního pohybu všech tří os X, Y, Z se každá z os pohybuje individuálně dle Obr 2.8 a měřené hodnoty jsou zaznamenány po každém z těchto jednotlivých kroků. [11]



Obr. 2.8: Měřicí body při krokovém diagonálním testu [11]

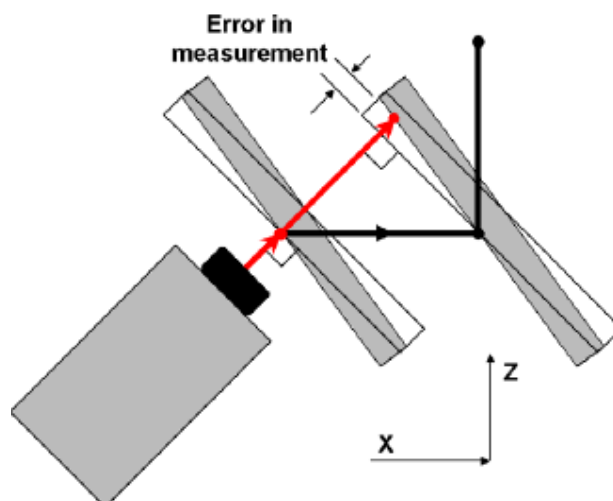


Obr. 2.9: Schéma průběhu krokového diagonálního testu [11]

Takto provedený test poskytuje třikrát více naměřených dat než klasický diagonální test. Dle studií [9], [10] je možno tato přidaná data zpracovat k určení lineární přesnosti polohování, přímosti, či kolmosti stroje. Detailní analýza společnosti

Renishaw [11] však ukazuje, že se zde opět objevují další chyby, způsobeny právě takovým pohybem a nastavením měřící aparatury.

Zejména tato studie upozorňuje na chybu nastavení referenčního zrcadla. Tato chyba je názorně vidět na Obr 2.10. Přestože by se tato chyba mohla zdát zanedbatelná, opak je pravdou. Pokud by chyba nastavení zrcadla byla $0,2\text{mm/m}$ (běžná chyba u podobných měření), a délka kroku v ose X 50mm , zaznamenáme přidanou chybu $7\mu\text{m}$. Tato chyba se navíc při každém kroku zvětšuje, tudíž konečná úchylka může činit až $140\mu\text{m/m}$ v ose X. Malá chyba v nastavení zrcadla tedy ve finále může hrát velmi významnou roli na výsledcích měření. Toto navíc bohužel platí, i pokud změníme pořadí jednotlivých sekvenčních kroků. A pokud bychom vyzkoušeli kompenzovat tuto chybu pomocí řídicího systému stroje, narazíme na problém, že ani tato chyba bohužel není v celém průběhu zkoušky konstantní, jelikož se v této chybě promítají i další již známé nepřesnosti stroje. [11]



Obr. 2.10: Znázornění chyby nastavení referenčního zrcadla [11]

Dle společnosti Renishaw tedy opět nelze tuto metodu měření přesnosti polohování brát jako vhodný způsob ke stanovení přesnosti polohování stroje, či například určení kompenzací řídicího systému stroje bez provedení dalších testů, jak již zmíněno výše.



2.3.2 Měření přesnosti polohování podle měřícího zařízení

Ke zjištění přesnosti polohování obráběcího stroje, čili míry shody mezi požadovanou a skutečnou polohou nástroje, bylo nutné najít princip schopný měřit vzdálenosti s co největší přesností, minimálně řádově větší než samotné polohovací systémy. Princip všech metod, které jsou schopné nabídnout tuto požadovanou přesnost, spočívá ve vysílání signálu, který odražený zpracováváme, a tuto zpětně přijatou informaci vyhodnocujeme ke zjištění relativní vzdálenosti námi sledovaného objektu (například včetně pohybujícího se stroje, vzdálenost obrobku upnutého na pracovním stole). Většina takových zařízení, poskytující požadovanou přesnost, přitom využívá laserového paprsku. Uveďme některé využitelné principy měření vzdáleností a několik současných zařízení, kterými se realizuje měření přesnosti polohování strojů.

2.3.2.1 Měření založena na Dopplerově jevu (LDDM)

Tato zařízení jsou založena na principu radaru, Dopplerově jevu a sčítání optického signálu o různých frekvencích (*optical heterodyning*). Tato metoda bývá také nazývána jako LDDM (*Laser Doppler Displacement Measurement*). Podobně jako Dopplerův radar, cíl (zde reflektor) je ozářen laserovým paprskem, který odráží zpět dle Obr 2.11. Reflektor se pohybuje, například s pracovním stolem obráběcího stroje. Odražený laserový paprsek z reflektoru má díky pohybu reflektoru jinou frekvenci. [12] Tuto změnu frekvence můžeme vyjádřit následovně:

$$f = \frac{2f_0}{c} v, \quad (2.2)$$

nebo

$$\frac{\Delta\Phi}{2\pi} = \frac{2f_0}{c} \Delta z, \quad (2.3)$$

kde f a $\Delta\Phi$ jsou změny frekvence, respektive fáze, v a Δz jsou rychlost a změna polohy reflektoru, f_0 je vlastní frekvence laseru a c rychlost světla. [12]

Fázový detektor měří změnu fáze, která koresponduje se změnou polohy reflektoru. Pokud je tato změna polohy větší než polovina vlnové délky $\lambda/2$, zaznamená se pomocí počítačů totální změna fáze

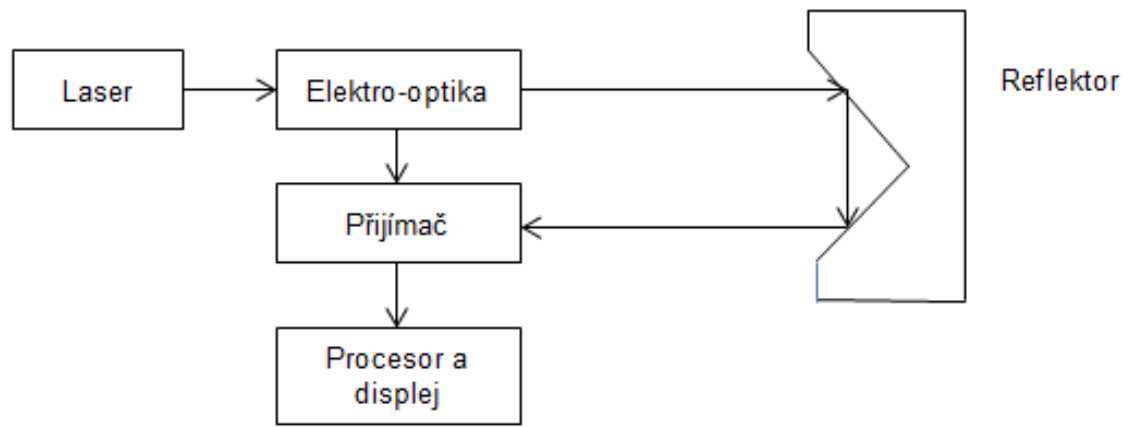
$$\Delta\Phi_{total} = 2\pi N + \Phi, \quad (2.4)$$

kde N je počet půlperiod laserového paprsku a Φ je fázový úhel menší než 2π .

Podobně je možné definovat totální přestavení reflektoru jako

$$\Delta z = \frac{c}{2f_0} \left(N + \frac{\Phi}{2\pi} \right) \quad (2.5)$$

Měřicí přístroj také obsahuje mikroprocesor, který měřené údaje zpracovává. Taktéž kompenzuje změny rychlosti světla dané změnami tlaku, teploty a vlhkosti a komunikuje s externím počítačem. [12]



Obr. 2.11: Schéma principu měření založeného na Dopplerově jevu [12]

Tento princip měření přesnosti polohování, dále označovaný jako LDDM, využívá firma Optodyne Inc. Konkrétní řadou systému pro kalibraci a měření jsou série označované jako LDS, LDS-1000 a LDS-2000. [13],[14]

LDDM poskytuje v porovnání se současnými laserovými interferometry srovnatelnou přesnost měření, přičemž cena zařízení je řádově výrazně nižší.



Obr. 2.12: Laserový kalibrační systém Optodyne LDS-2000 [14]

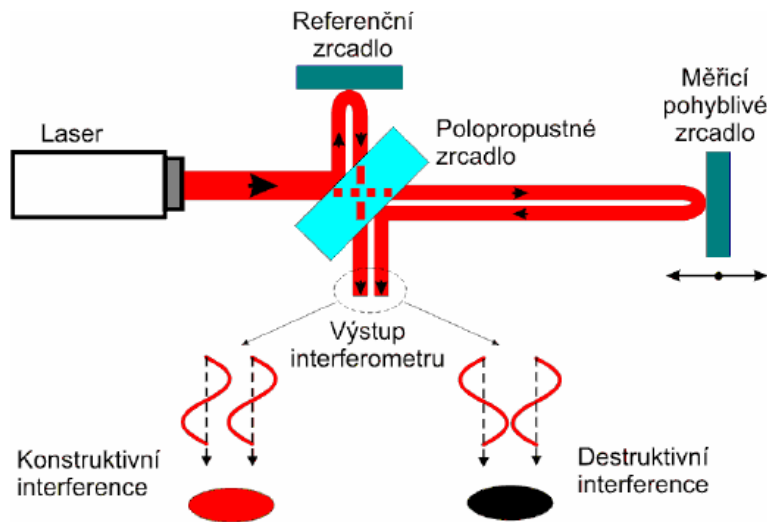
2.3.2.2 Měření laserovým interferometrem

Měření přesnosti polohování laserovým interferometrem je v současné době velmi rozšířenou metodou a laserové interferometry se díky své spolehlivosti a vysokému rozlišení v mnohém staly referenčním etalonem obecně v měření vzdáleností.

Základním a nejnámějším zástupcem laserových interferometrů je Michelsonův interferometr. Sestává ze zdroje laserového světelného paprsku a soustavy zrcadel dle Obr. 2.13. Zdroj laserového paprsku generuje světlo na vstup interferometru, které dopadá na polopropustné zrcadlo. Zde se vytvoří měřící a referenční svazek, který se odráží od fixního (referenčního) zrcadla a zároveň pohyblivého zrcadla zpět na polopropustné zrcadlo. Podle rozdílu délky ramen obou paprsků se vytváří na



výstupu interferometru konstruktivní či destruktivní interference a pomocí snímače získáváme signál, který má sinusový průběh. Perioda této sinusoidy představuje vlnovou délku laseru a posunutí pohyblivého zrcadla. [15], [16]



Obr. 2.13: Schéma a princip Michelsonova laserového interferometru [15]

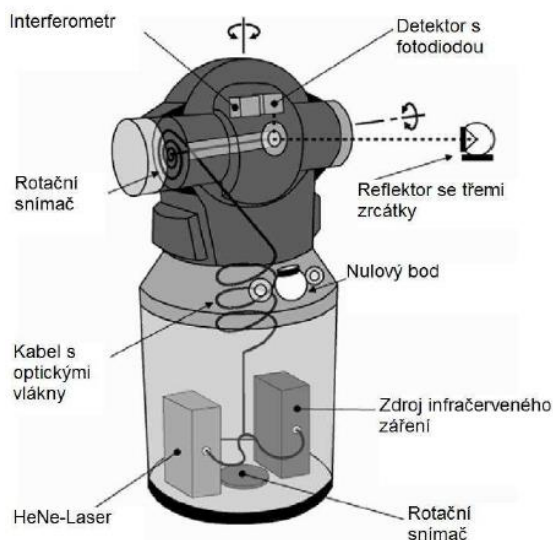
2.3.2.3 Laser Trackery a Laser Tracery

Referenční i měřící paprsek interferometru je u běžných interferometrických systémů nutné vhodně vyrovnat a nasměrovat. Přestavovat měřící aparát na každé měření při různých konfiguracích a technických parametrech obráběcích strojů je mnohdy obtížné a časově náročné. V devadesátých letech minulého století proto vznikla zařízení založená na laserovém interferometru, která jsou však schopna sama sledovat bod na libovolné dráze v prostoru. [16] Tato zařízení nazýváme Laser Trackery a Laser Tracery.

Přestože se tato zařízení používají převážně na měření volumetrické přesnosti strojů, čili měření přesnosti v celém pracovním prostoru stroje, můžeme je za využití softwaru využívajícího princip multilaterace použít i na měření přesnosti polohování lineárních os. Například německá společnost Etalon AG nabízí ke svým přístrojům LaserTracer a LaserTracer-MT software Track-CHECK, který je schopen provádět zkoušku dle ISO 230-2. Tento software je optimalizován pro ETALON LaserTracer, je však možné jej využít i za použití LaserTrackerů jiných společností, například Leica či Faro. [17]



Obr. 2.14: LaserTracker firmy Faro Technologies [18]



Obr. 2.15: Schéma Laser Trackeru [16]

Reflektor obsahuje 3 pravoúhlá zrcátka, pomocí kterých se paprsek z interferometru odráží zpět do fotodiody. Ta při sebemenším vychýlení vysílá signál, který nastavuje pohony vertikální a horizontální osy a paprsek interferometru pak neustále následuje reflektor. Klíčovými parametry těchto zařízení bývá jejich úhlový a vzdálenostní dosah. Trackery jsou schopné měřit vzdálenosti v desítkách metrů a mají úhlový dosah kolem 80°.[16]

2.3.2.4 Porovnání parametrů jednotlivých zařízení

Srovnáme parametry jednotlivých zástupců uvedených měřicích systémů v Tab 2.4.

Tab. 2.4: Srovnání zástupců laserových měřicích systémů [14, 19, 20]

Výrobce označení	a	Optodyne L109	Renishaw XL-80	Faro ION
Princip		Laser Doppler	Laser interferometr	Laser Tracker
Rozměry [mm]		216x51x51	214x120x70	311x556x214
Přesnost		1 $\mu\text{m}/\text{m}$	0,5 $\mu\text{m}/\text{m}$	16 μm + 4 $\mu\text{m}/\text{m}$
Rozlišení		0,6 μm	1 nm	0,5 μm
Rozsah		až 100 m	80 m	až 55 m
Doba stabilizace		20 min	< 6 min	5 min
Max. rychlost pohybu		4 m/s	4 m/s	4 m/s
Cena		~100 000 CZK	<1 000 000 CZK	>1 000 000 CZK

3 Měření přesnosti polohování

Cílem měření bylo získat tři z jedenadvaceti chybových parametrů měřeného stroje – přesnosti polohování v osách X, Y a Z. Tyto údaje budou dále sloužit kolegům z Ústavu matematiky FSI v Brně k vytvoření matematického popisu celého stroje. Díky matematickému popisu stroje můžeme odhalit příčiny jeho chování, které se jinak zjišťují velice obtížně a vstupuje zde značný význam empirie a několikaletých zkušeností. Zároveň je praktické měření způsob, jakým si lze osvojit metodiku a postup při zjišťování přesnosti polohování lineárních os.

Měřený stroj KOVOSVIT MAS MCV 754 QUICK patří Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky FSI VUT v Brně. K měření byl použit laserový interferometrický systém firmy Renishaw XL-80. Stroj byl proměřován ve dvou dnech, konkrétně 11. března a 2. dubna 2014. Postup měření zahrnuje zejména následující úkony:

- seznámení s měřeným strojem a jeho příprava k měření,
- sestavení laserinterferometrického měřicího systému a jeho zapojení,
- návrh cesty paprsku a rozvržení optických prvků,
- vyrovnání paprsku a ustavení optiky,
- návrh počtu měřených bodů a počet cyklů najíždění,
- nastavení měřicího softwaru a vygenerování NC kódu.

Přičemž poslední čtyři zmíněné úkony musíme provést pro každou osu zvlášť.

Po konzultaci s vedoucím práce a s ohledem na požadavky Ústavu matematiky VUT FSI v Brně byla zvolena následující strategie, která měření provést a jak postupovat:

- ve všech osách dle požadavku Ústavu matematiky provést 2 měření, jedno se 14, druhé se 40 měřícími body,
- zaznamenání teploty v průběhu zkoušky tak, aby se dal prověřit vliv teploty na naměřené výsledky,
- ve zvolené ose provést měření při různé posuvové rychlosti, opět z důvodu vyhodnocení vlivu posuvové rychlosti.

Na základě této rozvahy byla provedena série měření, jejichž parametry jsou uvedeny na konci této kapitoly v přehledné tabulce.

Nyní postupně popíšeme měřený stroj a jeho přípravu, měřící zařízení a metodiku ustavení optických prvků či vyrovnání paprsku tak, jak bylo postupováno při získávání dat z jednotlivých měření.

3.1 Měřený stroj a jeho příprava

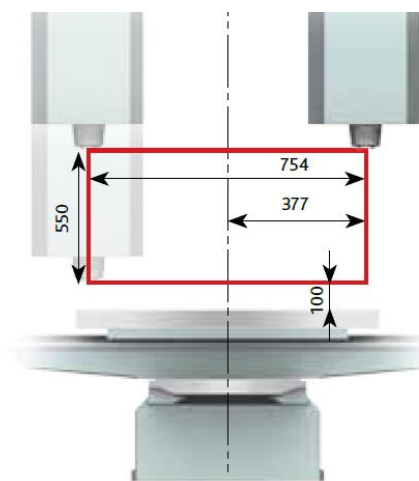
Měření přesnosti polohování bylo provedeno na stroji MCV 754 QUICK společnosti KOVOSVIT MAS a.s., kterým disponuje Ústav výrobních strojů, systému a robotiky FSI VUT v Brně. V Tab. 3.1 uveďme některé základní technické parametry stroje:

Tab. 3.1: Technické parametry MCV 754 QUICK KOVOSVIT MAS a.s. [21]

Rozměry stroje (dxšxv)	2320x2590x2560	[mm]
Hmotnost stroje	4000	[kg]
Upínací plocha stolu	1000x500	[mm]
Maximální zatížení stolu	400	[kg]
Maximální otáčky vřetene	10000	[min ⁻¹]
Kuželová dutina vřetene	ISO 40	-
Pracovní posuv	1-15000	[mm.min ⁻¹]
Odměřování	přímé	-
Přesnost nastavení polohy	0,012	[mm]
Opakovatelnost nastavení polohy	0,05	[mm]



Obr. 3.1: Vertikální obráběcí centrum KOVOSVIT MCV 754 QUICK [21]



Obr. 3.2: Pracovní prostor stroje KOVOSVIT MCV 754 QUICK [21]

Před samotným měřením je nutné vhodným způsobem připravit měřený stroj, většinou odstavený z výroby právě pro účely měření, testování či diagnostiky. Tato příprava spočívá zejména v zahřátí stroje na provozní teplotu. Teplota okolí by se měla pohybovat kolem 20°C. Během naprázdno poté dosáhneme teplotního ustálení měřeného stroje. Před měřením byl tedy spuštěn program, pomocí něž stroj „naprázdno“ najížděl na vhodné body tak, aby se teplotně ustálil. K tomuto účelu byly



na jednotlivé osy rozmístěny snímače teploty Saveris od firmy Testo, viz Obr. 3.3 a Obr. 3.4. Tyto komunikují přes bezdrátové WIFI rozhraní s počítačem a jejich pomocí jsme schopni monitorovat teplotu po celou dobu měření.



Obr. 3.3: Umístění teplotního snímače Testo Saveris pro osu Z

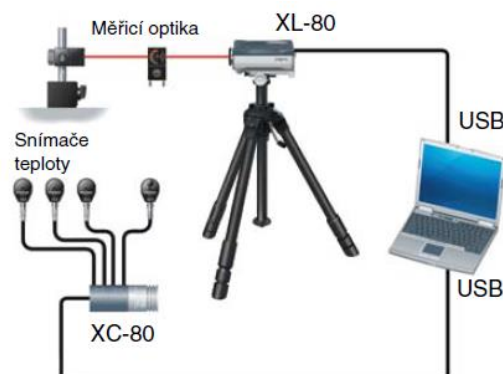


Obr. 3.4: Umístění teplotního snímače Testo Saveris pro osu X

3.2 Laserový interferometrický systém Renishaw XL-80

Měření přesnosti polohování uvedeného stroje bude provedeno měřícím systémem XL-80 společnosti Renishaw, kterým disponuje Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky FSI VUT v Brně.

XL-80 navazuje na starší model společnosti Renishaw, ML-10. Hlavními částmi tohoto systému jsou laserová hlavice XL-80, kompenzátor vlivu prostředí XC-80, k němu snímače okolního prostředí a stativ pro upevnění laserové hlavice. Velmi důležitým příslušenstvím měřícího systému je také příslušná optika, jako samotný interferometr, koutový odražeč či prvky pro upevňování a ustavování optiky. Různým sestavením optických prvků je možné měřící systém použít na měření polohování lineárního, úhlového, měření rovinnosti, přímosti, kolmosti aj. Celý systém je dodáván v kompaktním kufříku o rozměrech 560x455x265 mm a váze cca 20kg. [19]



Obr. 3.5: Schéma a klíčové komponenty laserového systému Renishaw XL-80 [19]



Obr. 3.6: Laserová hlavice XL-80 [19]



Obr. 3.7: Kompenzátor XC-80 a snímače okolního prostředí [19]

Součástí optické sady může být i zaměřovač paprsku LS350. Tento prvek usnadňuje nastavování laserového paprsku. Úhlově vyrovnává laserový paprsek ve svislé i vodorovné rovině.[19]

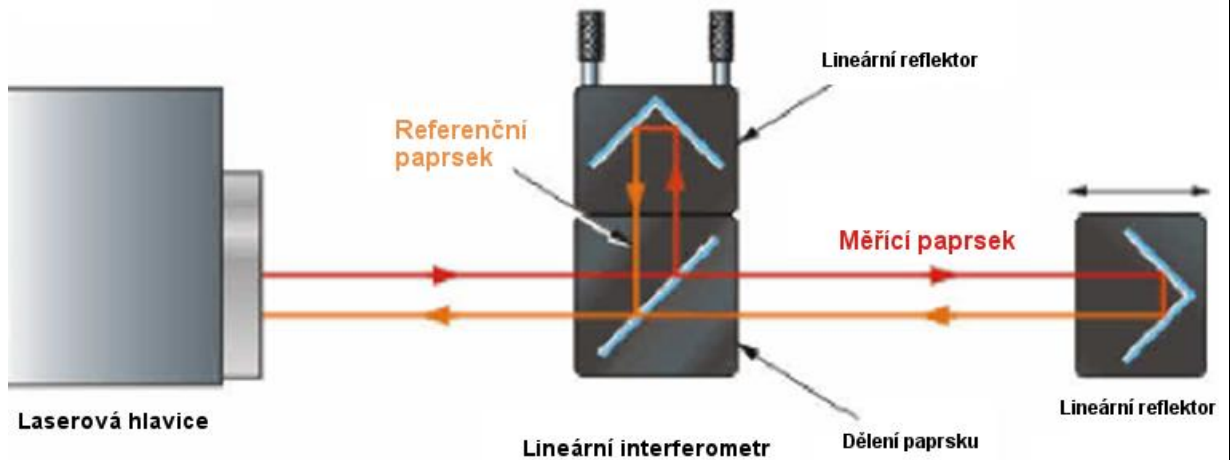
Tento prvek byl pro účely proměření stroje zapůjčen Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky FSI VUT v Brně a bylo jej možné použít již pro účely měření přesnosti polohování.



Obr. 3.8: Zaměřovač paprsku [19]

Lineární měření je při použití systému XL-80 nejběžnějším způsobem měření. Laserový systém měří lineární přesnost a opakovatelnost polohování v ose porovnáním polohy zobrazené na odečítacím zařízení stroje se skutečnou polohou, měřenou laserovým systémem. [22]

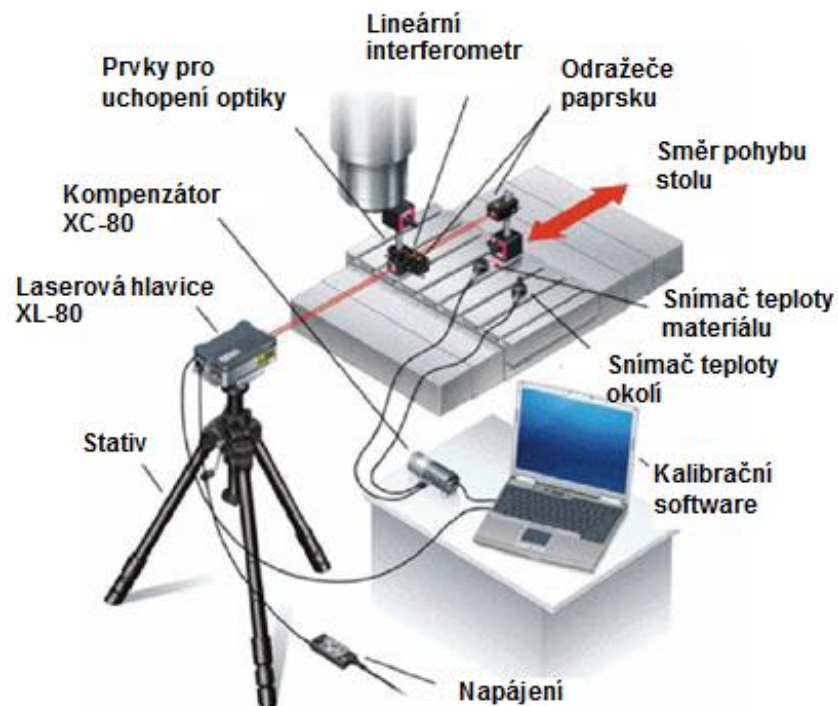
Princip relativního měření vzdálenosti je založen na použití Michelsonova interferometru, viz kapitola 2.3.2.2. Laserový paprsek z hlavice XL-80 vstupuje do lineárního interferometru, kde je rozdělen na dva. Jeden paprsek (známý jako referenční) je dále směřován do prvního reflektoru, který je upevněn na lineárním interferometru (nad polopropustným zrcadlem). Druhý paprsek (měřicí) prochází skrz polopropustné zrcadlo ke druhému odražeči. Oba paprsky jsou těmito reflektory odraženy zpět na polopropustné zrcadlo a do laserové hlavice, která zaznamenává změnu vlnové délky mezi oběma paprsky. Sestavení měřicí optiky a princip cesty paprsku můžeme vidět na Obr 3.9. [22]



Obr. 3.9: Princip lineárního měření systémem Renishaw XL-80 [22]

3.2.1 Zapojení měřícího systému a zapojení optiky

Dále je nutné sestavit a zapojit laserový měřící systém dle Obr. 3.10. Laserovou hlavici XL-80 ustavíme na stativ. Veškeré posuvové mechanismy pro nastavování hlavice laseru (úhlový, výškový a 2 posuvové) je vhodné nastavit na střed jejich rozsahu. Hlavici přibližně srovnáme rovnoběžně se směrem měřené osy a výškově vyrovnáme dostupnou vodováhou/bublinou. Po zapojení laserové hlavice se tato kalibruje a zahřívá na provozní teplotu po dobu 5 minut (dle specifikace výrobce), po které je možné přistoupit k vyrovnávání paprsku a nasměrování do ustavených optických prvků.



Obr. 3.10: Schéma zapojení laserového systému Renishaw XL-80 [22]

Nejdůležitějšími optickými prvky jsou 2 odražeče paprsku (reflektory) a samotný interferometr s polopropustným zrcadlem. Jeden z odražečů umístíme na interferometr. Optické prvky firmy Renishaw mají pro variabilitu ideální systém upevňování a dají se různě přestavovat. Dle tohoto sestavení jsme schopni nadefinovat konkrétní cestu paprsku pro různá měření. Spojením odražeče s interferometrem získáme 2 prvky. Tyto musíme sestavit a upevnit takovým způsobem, aby byl interferometr prvkem pevným (referenční paprsek) a odražeč paprsku (měřicí paprsek) byl pohyblivým, či obráceně. Většinou se používá první varianta s interferometrem jako stacionárním prvkem, která nám zajišťuje větší rozsah měření (až 40 metrů), proti variantě se stacionárním reflektorem (15 metrů). Interferometr jako stacionární prvek je doporučenou variantou uspořádání optických prvků i vzhledem k chybám, které mohou vznikat v opačné variantě z důvodu pohybujícího se interferometru. Interferometr je také doporučováno upevňovat například ve vřetenu stroje, držáku nástroje či obvyklých polohách obrobku, jelikož měření poté poměrně věrně kopíruje obráběcí proces. K upevňování a ustavování optiky na stroji používáme magnetické upínače a další prvky upínacích přípravků, dodávané přímo firmou Renishaw k měřicímu systému. Polohy reflektoru/interferometru či jiné optiky je vhodné zaznamenat do měřicího protokolu. [22]

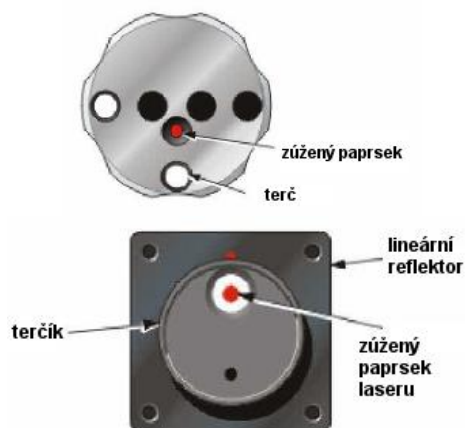
Máme-li ustavený stativ s laserovou hlavicí a sestaveny optické prvky, můžeme přistoupit k upevnění optických prvků a vyrovnávání paprsků.

3.2.2 Upevnění optiky a vyrovnání laseru

Při ustavování měřicího systému a optiky si musíme dopředu rozmyslet, jakou cestou povedeme paprsky, aby se nám měřicí a referenční skládaly zpět v laserové hlavici. Toho musíme docílit s co možná největším možným rozsahem měřené osy. Proces vyrovnávání a nasměrování paprsků vyžaduje pečlivost, zkušenost a je poměrně časově náročný. Platí, že jakmile máme ustavenou měřicí aparaturu a oba paprsky se nám skládají v laserové hlavici podél celého rozsahu měřené osy, máme nejnáročnější část měření za sebou. [22]

Při ustavování interferometru a reflektoru postupujeme následovně: [22]

- Tripod s laserovou hlavicí srovnáme přibližně s měřenou osou stroje a nasměrujeme na měřicí optiku
- Otočíme závěrku laserové hlavičky tak, abychom získali zúžený vystupující paprsek. Tento je vhodnější pro vyrovnávání – zpozorujeme i malé vychýlení paprsku.
- Najedeme s odražečem paprsku co nejbližší laseru a na odražeč umístíme terčík s bílou tečkou, aby tato byla nahoře. (v tuto chvíli by mezi hlavicí a odražečem neměl být interferometr).



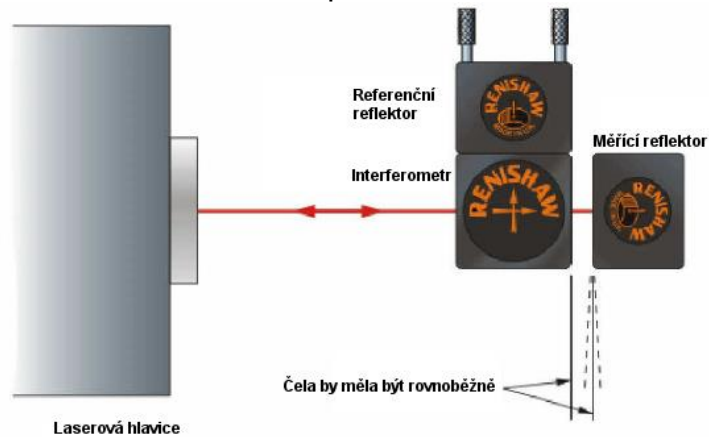


BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

- Sundáme terčik a zkontrolujeme, zda se odražený paprsek vrací zpět na střední bílý terč na závěrce laseru. Pokud ne, vyrovnáme takto paprsek pomocí polohování stroje nebo laseru.



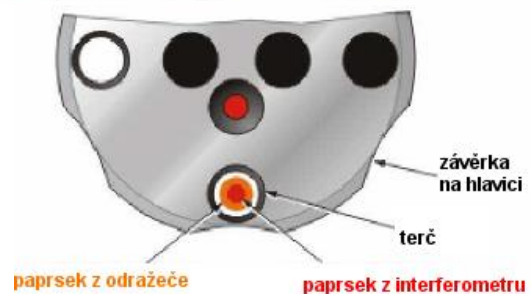
- Umístíme interferometr co nejbližší k odražeči dle následujícího obrázku. Čela obou optických prvků by měla být přibližně rovnoběžně vůči sobě a čelu stolu/stroje. V zásadě je doporučeno, aby natočení interferometru nebylo více než 2° , což je většinou možno docílit přibližně od oka.



- Terčik tentokrát upevníme na interferometr a umístíme tak, aby paprsek mířil do středu bílého místa.



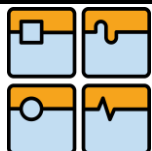
- Po sundání terčíku se musí oba paprsky skládat na bílém terči závěrky laserové hlavice. K nasměrování paprsku z interferometru je vhodné zastínit již vyrovnaný paprsek z odražeče.



Takto se musí oba laserové paprsky skládat přes sebe na bílém místě závěrky interferometru přes celý rozsah měřené osy. Pokud se nám při pohybu podél osy začne paprsek z reflektoru vychylovat a nemíří na toto místo, začínáme vyrovnávat paprsek následovně: [22]

- Oddalujeme reflektor a zastavíme v momentě, kdy se paprsek nachází na rozhraní bílého terče a závěrky laserové hlavice.





BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

- Použitím posuvného mechanismu v zadní části laserové hlavičky zarovnáme oba paprsky vertikálně do stejné výšky.



- Nyní vyrovnáme paprsek do středu bílého terče na závěrce pomocí výškového nastavovacího stativu.



- Pomocí menší klíčky na levé straně stativu hlavičky vyrovnáme oba paprsky, aby se překrývaly.

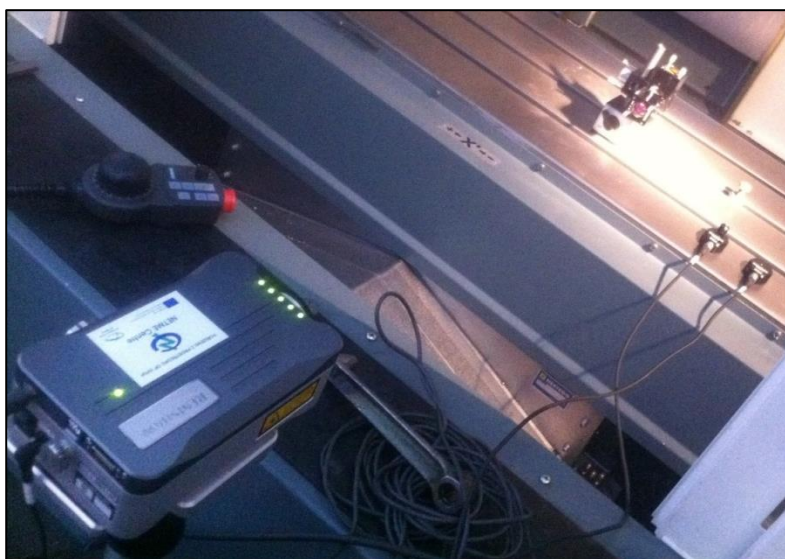


- Poté pomocí větší klíčky na levé straně stativu hlavičky nasměrujeme překrývající se paprsky na střed bílého terče závěrky laserové hlavičky.



- Tento postup opakujeme při oddalování reflektoru na konec měřené dráhy. **Paprsky se musí překrývat na bílé terči závěrky přes celý rozsah měřené dráhy.** [22]

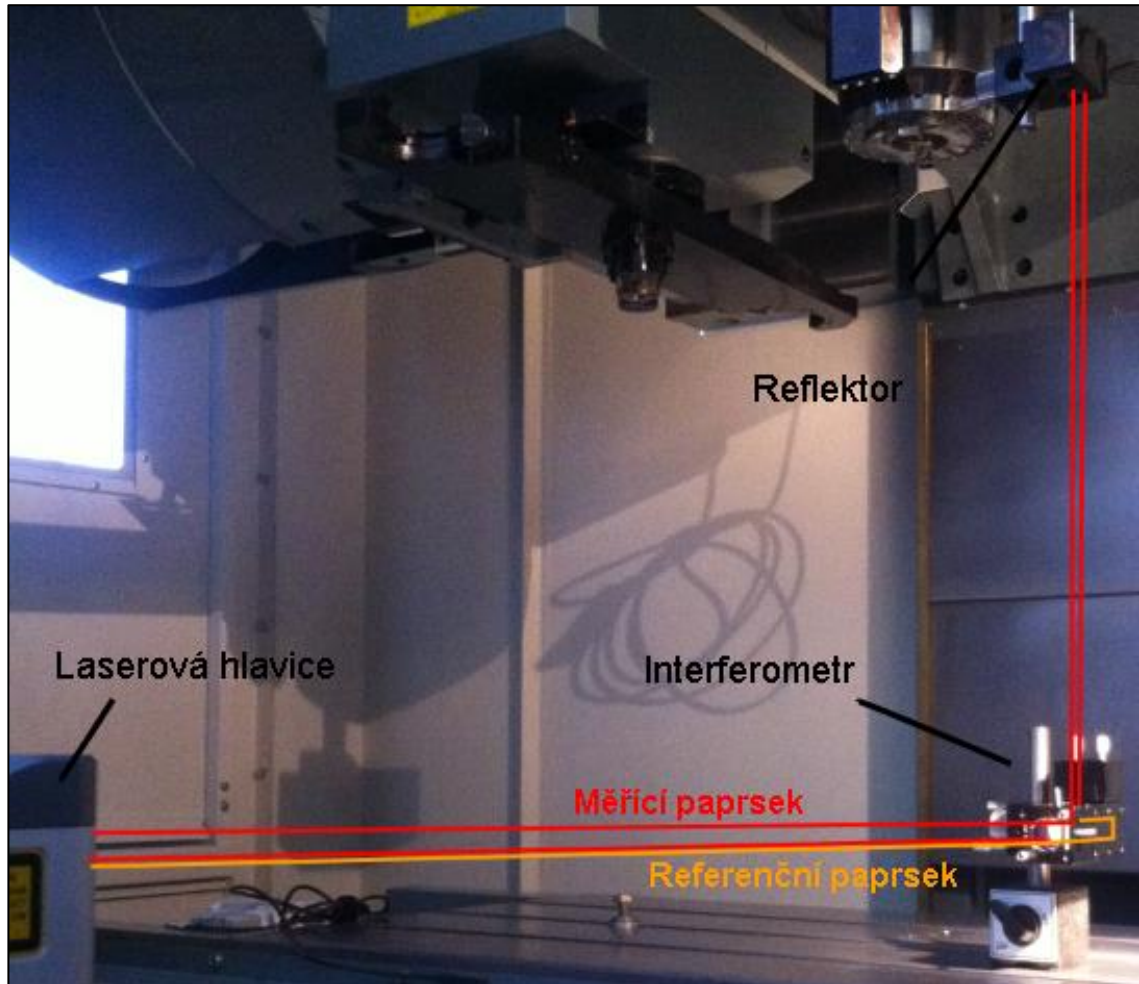
Takto se skládající paprsky jsou zdrojem signálu pro laserovou hlavičku XL. Ke kontrole dostatečného signálu slouží diody na laserové hlavičce. Čím větší signál, tím více diod svítí zelenou barvou, viz Obr. 3.11. Cílem je indikace plného signálu během polohování stroje v celém rozsahu měřené osy.



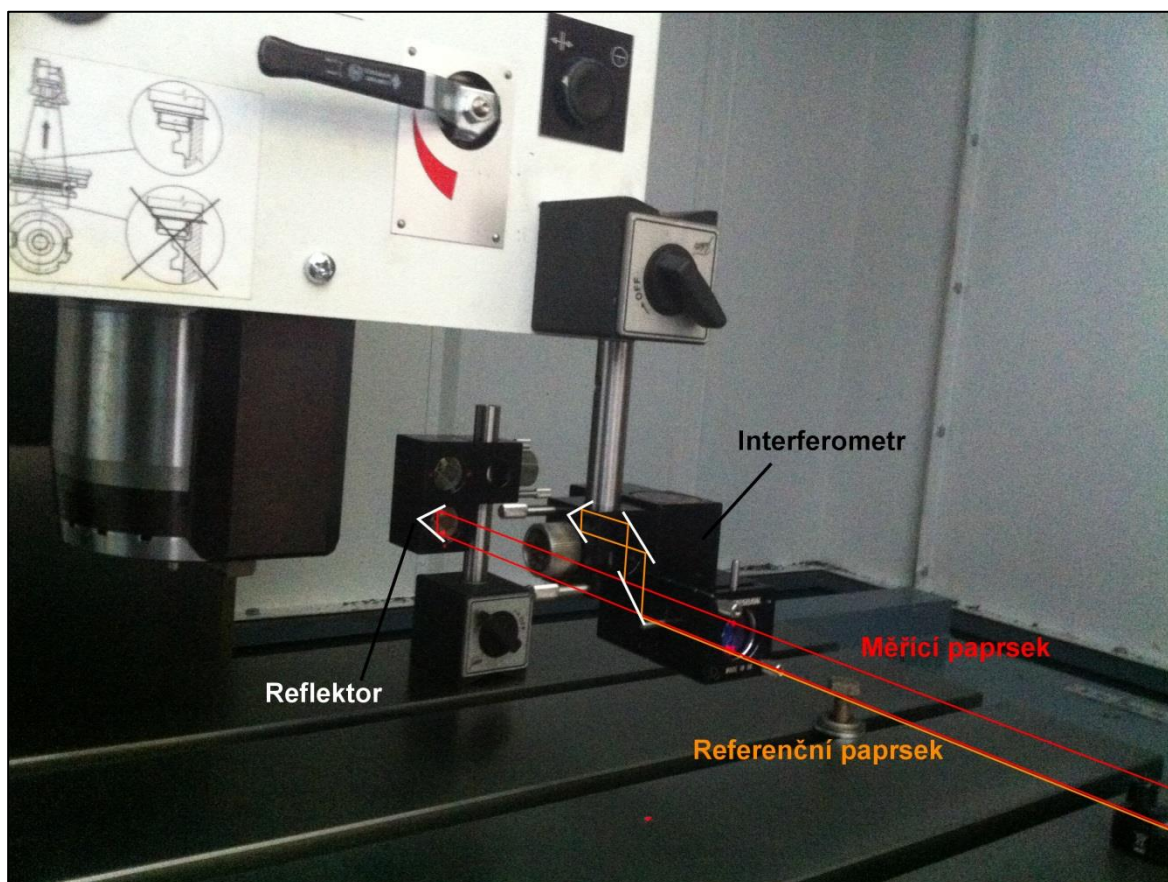
Obr. 3.11: Indikace signálu laserové hlavičky



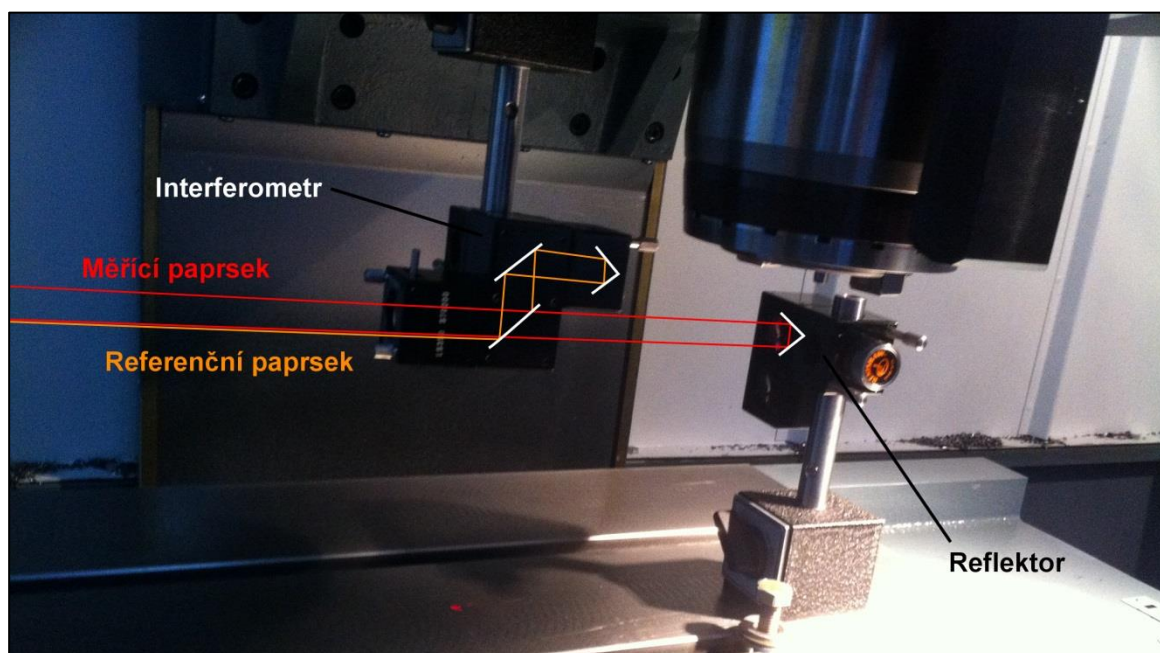
Uspořádání optiky a cesty paprsku pro jednotlivé osy při měřeních, která jsme provedli, jsou zřejmé z následujících Obr. 3.12, Obr. 3.13 a Obr. 3.14.



Obr. 3.12: Schéma cesty paprsku v ose Z



Obr. 3.13: Schéma cesty paprsku v ose Y



Obr. 3.14: Schéma cesty paprsku v ose X

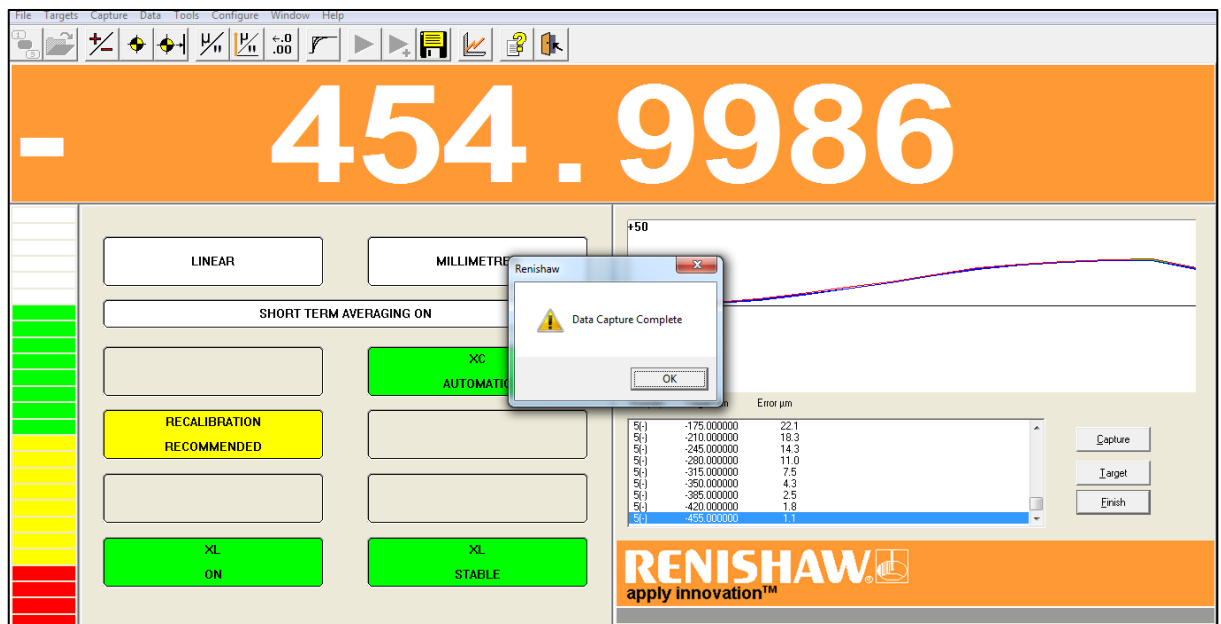


3.2.3 Prostředí software pro zaznamenávání dat

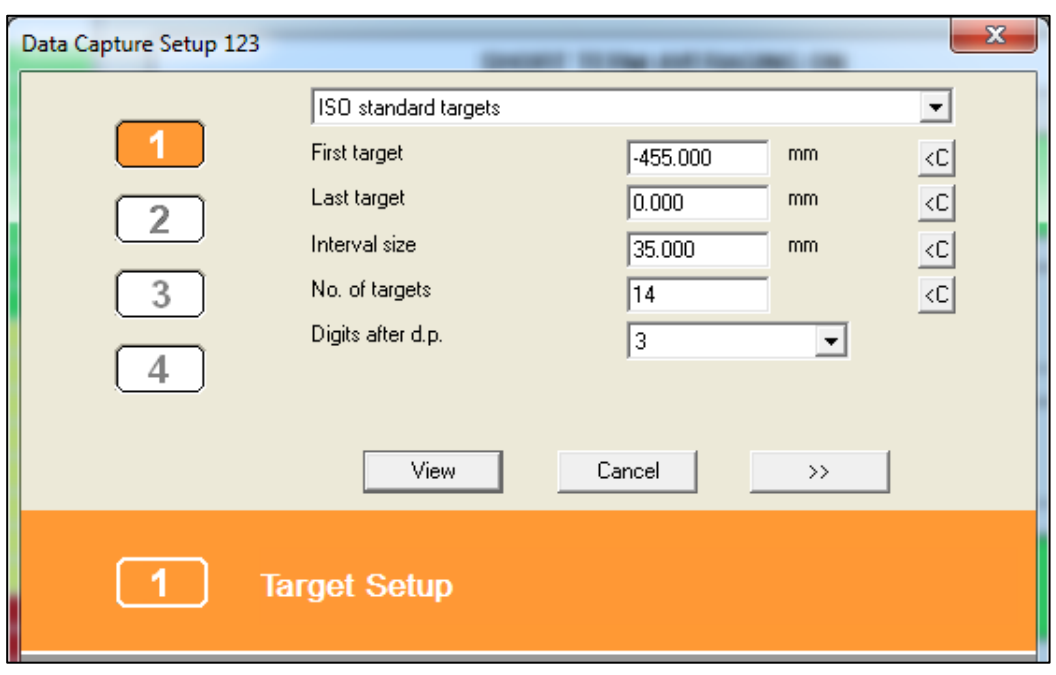
Jak již uvedeno výše, ustavení optiky a vyrovnaní paprsku je při lineárním měření časově nejnáročnější. Podaří-li se nám nastavit měřící aparaturu do tohoto stavu, máme z velké části vyhráno. Nyní můžeme definovat měřící body dle libosti v již známém rozsahu měřené osy.

K tomuto účelu slouží software Renishaw LaserXL Capture. Tento software nainstalujeme do počítače, který máme propojený přes USB rozhraní s laserovou hlavicí XL a kompenzátorem XC. Prostředí tohoto programu můžeme vidět na Obr. 3.15 či Obr. 3.16. LaserXL nám dle zadané kombinace zvolených hodnot (koncový + počáteční bod nebo počáteční či koncový bod + počet bodů) nadefinuje polohy bodů a následně i vygeneruje NC kód. Po vložení tohoto kódu do stroje a spuštění již systém sám automaticky najíždí do zadaných bodů a při spuštění funkce „Auto Capture“ i sám ukládá data a hodnoty odchylek jednotlivých bodů.

Důležité je při nastavování programu dbát ohled na toleranční prostor (*tolerance window*) měření. Tento vyjadřuje, v jakém rozlišení bude měřící systém zaznamenávat odchylku od přesné polohy. Pokud bychom měli toleranční prostor (okno) menší než délku kroku mezi jednotlivými body, program by nebyl schopen hodnoty zaznamenat. Také věnujeme pozornost délce přejezdu, zda nám vystačí rozsah měřené osy.



Obr. 3.15: Prostředí programu Renishaw LaserXL Capture



Obr. 3.16: Okno nastavování měřících bodů v Renishaw LaserXI Capture



3.3 Zkušební podmínky při jednotlivých měřeních

Dle úvodní rozvahy bylo po zapojení systému a vyrovnaní paprsku dle výše uvedeného postupu navrženo několik měření ve všech osách s různými parametry. Nejdůležitější parametry těchto měření jsou souhrnně uvedeny v následující Tab. 3.2.

Tab. 3.2: Tabulka shrnující veškerá provedená měření a jejich parametry

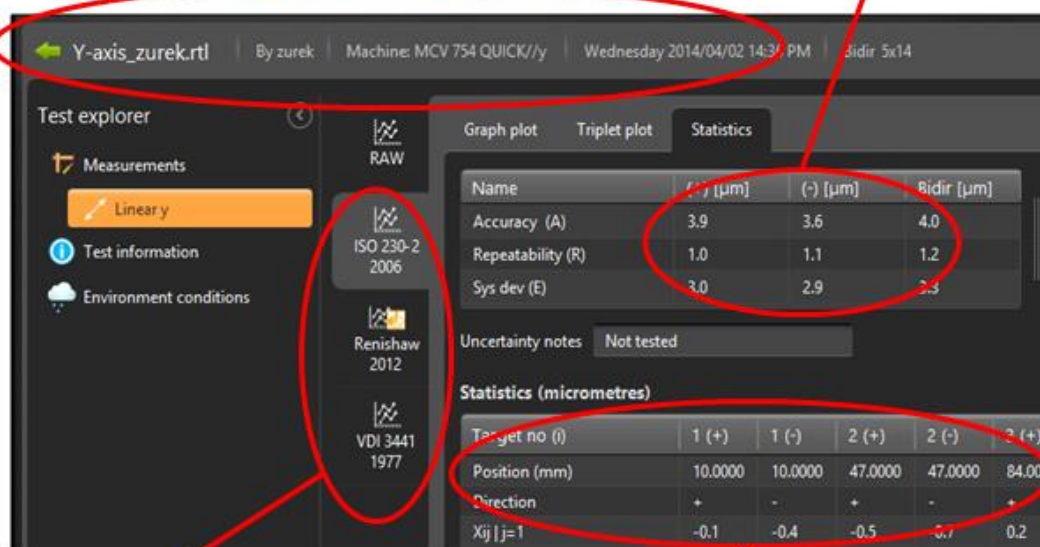
Provedená měření											
Osa	X						Y			Z	
Datum	11.3.	2.4.2014					11.3.	2.4.2014		2.4.2014	
Označení měření	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Y1	Y2	Y3	Z1	Z2
Časový úsek	15:22	16:09	16:31	17:16	17:48	18:06	15:22	14:36	15:02	12:48	13:30
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15:45	16:26	17:13	17:36	18:03	18:20	15:45	14:53	15:37	13:10	14:03
Rozsah (od-do) [mm]	25	5	5	100	100	100	25	10	10	-455	-448,5
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	725	746	746	600	600	600	475	491	497	0	0
Počet měřených bodů	14	14	40	6	6	6	10	14	40	14	40
Krok [mm]	50	57	19	100	100	100	50	37	12,5	35	11,5
Průměrná teplota (X/Y/Z) [°C]	19,38	20,73	20,90	21,04	21,15	21,22	19,02	20,55	20,52	20,18	20,3
	18,49	19,63	19,69	19,75	19,80	19,83	18,22	19,43	19,47	19,2	19,28
	21,55	21,4	21,59	21,73	21,83	21,9	21,03	21,14	21,12	20,76	20,93
Rychlost posuvu [mm/min]	1000	1000	1000	1000	3000	5000	1000	1000	1000	1000	1000
Najíždění do polohy	ručně	NC kód	NC kód	NC kód	NC kód	NC kód	ručně	NC kód	NC kód	NC kód	NC kód

4 Výsledky a vyhodnocení měření

Ke zpracování naměřených dat, zaznamenaných pomocí software LaserXI, použijeme jiný software společnosti Renishaw – XCal-View 2.1. Tento software umožňuje vyhodnocování lineárního a úhlového měření, měření rovinnosti, přímosti, kolmosti aj. Pro lineární měření umožňuje jednoduché vyhodnocení a porovnání dle několika standardů, včetně ISO 230-2 či VDI 3441. Je možné jej zároveň využít k vygenerování kompenzační stroje při kalibraci. Naměřená data a grafy se taktéž dají vyexportovat do dalších programů, což umožňuje jejich případné další zpracování. [23]

Název souboru, autor, stroj, datum a čas

Vypočtené parametry dle normy



Volba normy

Naměřené hodnoty odchylek

Obr. 4.1: Náhled vyhodnocení testu v programu Renishaw XCal-View v2.1



4.1 Naměřené výsledky dle ISO 230-2

Uvedme klíčové parametry, doporučené k publikování normou ISO 230-2:2006, pro všechny tři osy dle jednotlivých konfigurací a nastavení měření. Tyto parametry slouží k posouzení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v jednotlivých osách stroje. Pro úplnost uvedme popis zmíněných parametrů, které norma 230-2 doporučuje k vyhodnocování zkoušky, viz také kapitola 2.2 této práce.

Tab. 4.1: Výsledky měření přesnosti a opakovatelnosti polohování dle ISO 230-2

Výsledky jednotlivých měření											
Osa	X						Y			Z	
Datum	11.3.	2. 4. 2014					11.3.	2. 4. 2014		2. 4. 2014	
Označení měření	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Y1	Y2	Y3	Z1	Z2
A [μm]	22,4	21,5	22,4	16,8	16,8	16,9	9,0	4,0	5,0	27,5	27,4
R [μm]	2,6	1,5	1,2	1,3	0,9	0,9	5,0	1,2	1,7	1,3	1,3
E [μm]	21,0	21,1	22,0	16,3	16,5	16,3	5,4	3,3	4,3	27,0	26,6
B [μm]	0,8	0,5	0,6	0,5	0,4	0,3	1	0,4	0,5	0,9	0,7
\bar{B} [μm]	0,5	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,8	0,2	0,2	-0,6	-0,4
M [μm]	20,5	20,8	21,7	15,9	16,1	16,0	4,6	3,0	3,9	26,2	26,1

kde

A (Dvoustranná **přesnost** nastavení polohy v ose) [μm]

R (Dvoustranná **opakovatelnost** nastavení polohy v ose) [μm]

E (Dvoustranná **systematická polohová úchylka** polohy v ose) [μm]

B (**Necitlivost** v ose) [μm]

\bar{B} (**Průměrná necitlivost** v ose) [μm]

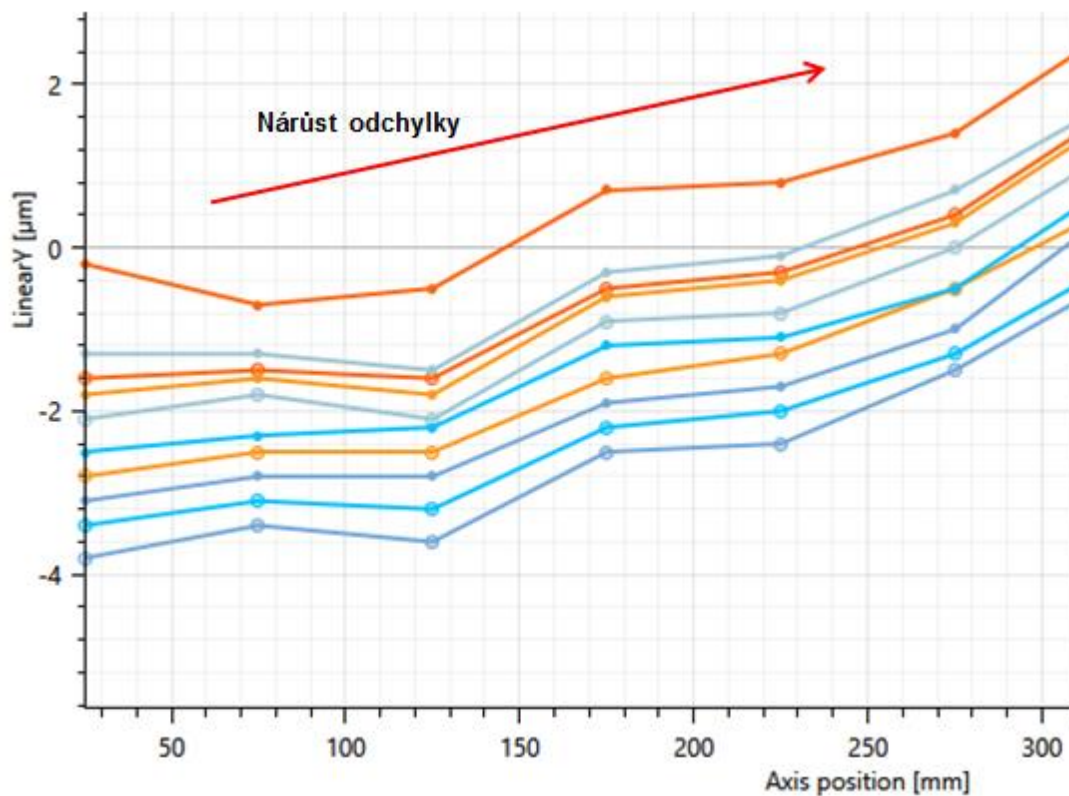
M (Průměrná dvoustranná **polohová úchylka** v ose) [μm]

Tučně jsou v Tab. 4.1 vyznačeny nejméně příznivé hodnoty parametrů přesnosti a opakovatelnosti v jednotlivých osách.

Software generuje i příslušné grafy závislosti odchylky na polohování podél osy. Všechny osy vykazují při polohování podél osy v průměru kumulativně se zvyšující odchylku a zároveň dobrou opakovatelnost nastavování polohy. Ukázka tendence těchto grafů je zřejmá z Obr. 4.2. Veškeré grafy závislostí úchylky na poloze v ose z jednotlivých měření jsou uvedeny v příloze této práce.



Příčinou kumulace odchylky se vzrůstající vzdáleností v ose jsou s největší pravděpodobností geometrické (výrobní) nepřesnosti broušeného kuličkového šroubu stoupání jednotlivých os či výrobní nepřesnosti pravítek optických odměřování.



Obr. 4.2: Ukázka tendence grafu závislosti úchyly polohy na poloze v ose

4.2 Porovnání jednotlivých měření

Kromě vyhodnocení normovaných parametrů stroje je naším cílem porovnání provedených měření, případně zkoumání vzájemných závislostí mezi nastavením zkušebních parametrů a výsledky zkoušky. Zajímá nás, jaký vliv má na jednotlivá měření a jejich výsledky nastavení parametrů jako počet zkušebních kroků, teplota stroje či zvolená posuvová rychlost.

K vyhodnocení těchto závislostí můžeme využít statistických nástrojů, zejména parametrických testů. Předpokládáme, že odchylky od skutečné polohy mají v jednotlivých bodech normální rozdělení. Poté můžeme testovat, zda byl určitý zásah či změna parametrů faktorem, který podstatně ovlivnil a změnil měření na určité hladině významnosti. K tomuto účelu můžeme využít parametrických testů dat F-test – test rozptylů a Studentův t-test – test střední hodnoty. Tento postup porovnání měření byl zvolen na základě konzultace s vedoucím práce. [24]

F-testem ověřujeme vliv provedeného zásahu, v našem případě vliv nastavení různých zkušebních podmínek, na proměnlivost, čili rozptyl zkoumané veličiny, v našem případě odchylky od přesné polohy. Postup při testování dvou rozptylů je možné shrnout následovně. Nejprve vypočteme výběrové rozptyly s_1^2 a s_2^2 .



$$s_1^2 = \frac{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n_1}}{n_1 - 1} \quad (4.1)$$

$$s_2^2 = \frac{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n_2}}{n_2 - 1} \quad (4.2)$$

kde $\sum x_i$ je součet odchylek v poloze a n_1 respektive n_2 jsou počty hodnot jednotlivých statistických souborů. [24]

Počet stupňů volnosti obou výběrů se stanoví dle

$$v_1 = n_1 - 1 \quad (4.3)$$

pro s_1^2 a

$$v_2 = n_2 - 1 \quad (4.4)$$

pro s_2^2 . [24]

Následně spočteme testové kritérium F jako podíl většího a menšího z rozptylů. Dále zvolíme hladinu významnosti α a s pomocí statistických tabulek vyhledáme kritickou hodnotu $F_{\text{krit.}}$. [24]

Je-li $F > F_{\text{krit.}}$, poté zamítáme nulovou hypotézu H_0 ($s_1^2 = s_2^2$). Jinými slovy to tedy znamená, že rozptyly obou souborů se statisticky významně liší (tj. výběry pocházejí ze dvou různých základních souborů s rozdílnými rozptyly). Symbolicky lze tento závěr taktéž psát: $p < 0,05$ (příp. $p < 0,01$ podle zvolené hladiny významnosti α). [24]

Je-li $F < F_{\text{krit.}}$, pak nemůžeme zamítnout hypotézu H_0 . Znamená to tedy, že rozptyly obou souborů se statisticky významně neliší (tj. výběry pochází ze stejného základního souboru se společným rozptylem s_2). Symbolicky lze závěr psát: $p > 0,05$ opět dle zvolené hladiny významnosti. [24]

Na test rozptylů bude v našem případě následovat Studentův t-test, kterým ověříme, zda měla změna konfigurace a parametrů měření vliv na naměřené výsledky.

Vyslovíme nulovou hypotézu H_0 , že soubor dat z měření s rozdílným parametrem či konfigurací zkoušky má stejnou střední hodnotu, jako soubor dat z měření výchozího. Tuto nulovou hypotézu symbolicky zapíšeme jako

$$H_0: \mu = \text{konst.} \quad (4.5)$$

Testové kritérium tohoto parametrického testu vypočteme dle

$$t = \frac{|\bar{x} - \mu|}{\sqrt{\frac{s^2}{n}}} \quad (4.6)$$

kde \bar{x} je aritmetický průměr výběrového souboru, μ je střední hodnota základního souboru, s^2 je rozptyl výběrového souboru a n je počet členů výběrového souboru. [24]

V dalším kroku opět vyhledáme ze statistických tabulek kritickou hodnotu $t_{1-\alpha/2(v)}$, kde α je hladina významnosti a v počet stupňů volnosti. [24]

Poté je-li $t \leq t_{1-\alpha/2(v)}$, sledujeme statisticky nevýznamný rozdíl testovaných parametrů při zvolené α (nulová hypotéza H_0 platí, tzn. výběrový soubor pochází ze souboru s uvedenou střední hodnotou $\mu = \text{konst.}$). Můžeme tedy konstatovat, že rozdílné parametry měření, které jsme testovali, nemají na naměřená data vliv (symbolicky: $p > 0,05$). [24]

Je-li však $t > t_{1-\alpha/2(v)}$, sledujeme statisticky významný rozdíl testovaných parametrů při zvolené α (nulovou hypotézu H_0 nelze přijmout, tzn. výběrový soubor nepochází ze souboru se známou střední hodnotou, ale ze souboru s jinou střední hodnotou, kde $\mu \neq \text{konst.}$). Závěrem tedy můžeme říci, že tato změna zkušební konfigurace či jiného parametru zkoušky měla vliv na naměřené výsledky, neboli zápis $p < 0,05$. [24]

Parametrické testy byly provedeny pomocí software Microsoft Excel, konkrétně použitím funkcí FTEST a TTEST. Funkce TTEST nám po zadání testovaných souborů dat a jejich parametrů vrátí hodnotu p , která představuje pravděpodobnost vyslovené nulové hypotézy. Dle této hodnoty poté zamítneme či nezamítneme nulovou hypotézu na zvolené hladině významnosti. [24]

4.2.1 Vliv teploty

Vliv teploty a délková roztažnost materiálů má v přesném strojírenství velký význam. Vzhledem k tomu, v jakých řádech se pohybujeme, předpokládáme určitý vliv proměnné teploty na naměřené výsledky. I norma samotná specifikuje zkušební teplotu kolem 20°C.

Vliv teploty jsme se rozhodli analyzovat porovnáním měření ze dvou různých měřících dnů, tedy v osách X a Y ze dnů 11. 3. a 2. 4. 2014. Jednak se jednalo o měření s podobnými parametry (přibližně stejný počet kroků, stejná posuvová rychlost), jednak byl rozdíl v průměrných teplotách stroje poměrně významný, téměř 1°C. Pokud bych analyzoval měření ze stejných dnů, rozdíl teploty mezi jednotlivými měřeními by byl menší, navíc již z naměřených hodnot normovaných parametrů v Tab. 4.1 vidíme, že jsou normované parametry i hodnoty jednotlivých úchylek v polohách téměř totožné. Například měření v ose Z byla provedena velmi rychle po sobě, změna teploty se tedy téměř neměla šanci projevit. Stejně tak měření ve všech osách ze stejných dnů, jak již zmíněno.



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Na hladině významnosti 0,05 tedy budeme testovat hypotézu H_0 o shodě rozptylů dvou statistických souborů, tedy zkoumat, zda má změna průměrné teploty stroje vliv na námi provedená měření. Tab. 4.2 ukazuje teplotní parametry měření v osách X a Y, která mezi sebou testujeme. Označení měření taktéž korespondují s výše uvedenými Tab. 4.1 a Tab. 3.2.

Tab. 4.2: Rozdíly teplot ze dvou měřících dnů

Označení měření v ose X	X1	X2	Rozdíl teplot [°C]
Průměrná teplota stroje [°C]	19,423	20,373	0,95
Označení měření v ose Y	Y1	Y2	Rozdíl teplot [°C]
Průměrná teplota stroje [°C]	20,586	20,586	0,786

Nutno poznamenat, že pro námi zamýšlený test byly vskutku nevhodně zvoleny parametry jednotlivých měření. I přesto, že bylo snahou testovat dva soubory s nejlépe úplně totožnými parametry, kromě teploty, kterou testujeme, vždy byly podmínky a nastavení zkoušky mírně odlišné. V ose X byl například největší rozdíl teploty mezi měřeními X1 a X2. Ovšem taktéž byl zvolen jiný rozsah osy, krok, tím pádem i nastavení měřících bodů. Stroj tedy nepoložoval do stejných poloh, shoduje se pouze v jedné poloze, $X=575\text{mm}$. Otestujme tedy, jak se rozdíl teploty u měření X1 a X2 projevil právě v této hodnotě polohy v ose X. Vybranými statistickými soubory jsou tedy odchylky od zadané polohy 575 mm v ose X pro měření X1 a X2 dle Tab. 4.1. Tyto hodnoty, spolu s hodnotami provedeného F-testu a T-testu jsou uvedeny v Tab. 4.3.

Tab. 4.3: Odchylky od polohy 575 mm při měřeních X1 a X2 a parametrické testy

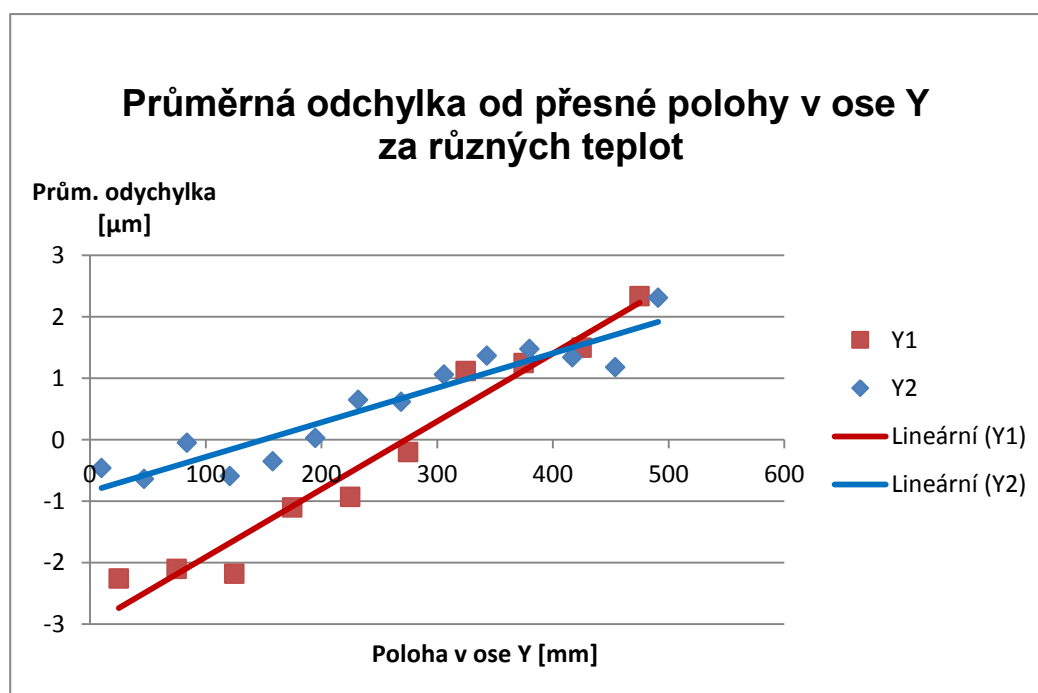
Označení měření	X1	X2
Poloha [mm]	575	575
Run1 [μm]	15.6	15.1
Run2 [μm]	15	14.7
Run3 [μm]	15.4	15.2
Run4 [μm]	14.9	14.8
Run5 [μm]	15.1	15.3
Run6 [μm]	14.6	15
Run7 [μm]	15	15.6
Run8 [μm]	14.5	15.2
Run9 [μm]	14.8	15.7
Run10 [μm]	14.2	15.2
F-test	0.4086598	
Významnost	$p>0,05(-)$	
T-test	0.1173488	
Významnost	$p>0,05(-)$	

Na hladině významnosti tedy nezamítáme nulovou hypotézu H_0 o shodě rozptylů a středních hodnot dvou statistických souborů. Změna teploty v ose X tedy neměla dle námi provedeného testu vliv na naměřené výsledky odchylky od zadané polohy.



V ose Y bohužel při měření, ve kterých se nejvíce lišila zkušební teplota (tedy Y1 a Y2 dle Tab. 4.1), stroj nebyl polohován ani v jednom měřicím bodu do stejné polohy. Přesto je již na základě uvedených normovaných parametrů dle ISO 2130-2 z Tab. 4.1 patrné, že změna teploty mohla mít vliv na naměřené výsledky (zejména parametr přesnosti A je pro Y1 roven $9\mu\text{m}$, zatímco pro Y2 je $4\mu\text{m}$).

Následující závislosti ukazují průměrné odchylky od zadané polohy v ose Y pro obě zmíněná měření, viz Obr. 4.3.



Obr. 4.3: Průměrné úchytky od přesné polohy v ose Y za různých teplot

Z naměřených parametrů viz Tab. 4.1 a těchto vykreslených závislostí usuzujeme, že mírně zvýšená teplota pozitivně ovlivnila polohování v ose Y.

Zatímco v ose X se tedy teplotní rozdíl příliš na polohování neprojevil, v ose Y byly po nárůstu teploty naměřeny mírně odlišné hodnoty a stroj polohoval přesněji. Tento fakt je možná způsobem tím, že osa Y je vůči ose X z hlediska polohování přesnější o cca $10\mu\text{m}$, změna teploty se zde tedy v tomto rozlišení proto mohla projevit více.

Nutno poznamenat, že pro jednoznačné vyhodnocení vlivu teploty bychom museli provést více měření za stejných teplot, také by bylo vhodné testovat vliv teploty na měřeních s naprosto shodnými parametry (rozsah, počet měřených bodů a stejné polohy, najíždění pomocí NC kódu aj.). Vybrali jsme dvě měření s přibližně nejvíce podobnými parametry, i tak však mohou být údaje mírně zkreslené. Jakékoliv změny a odlišné parametry totiž mohou měření také ovlivnit a vliv teploty bude tedy při nastavení různých podmínek zkoušky vždy zkreslený.



4.2.2 Vliv počtu měřících bodů

Obdobným způsobem jako test vlivu teploty je možné zkoumat, jakým způsobem ovlivní námi provedené měření parametrů počtu nastavení měřících bodů.

Pro analýzu tohoto faktoru byly jako vhodné testové soubory dat vybrány naměřené odchylky měření v ose X označených jako X2 a X3, viz Tab. 3.2 a Tab. 4.1. V těchto měřeních bylo nastaveno 14, respektive 40 měřících bodů, přičemž ostatní parametry jako zejména teplota, která se změnila v tomto časovém intervalu pouze minimálně, a posuvová rychlost, zůstaly beze změny. Navíc se při polohování shodovaly najížděné polohy, získáme tedy větší datové soubory, vhodné k testování, než při ověřování vlivu teploty v kapitole 4.2.1.

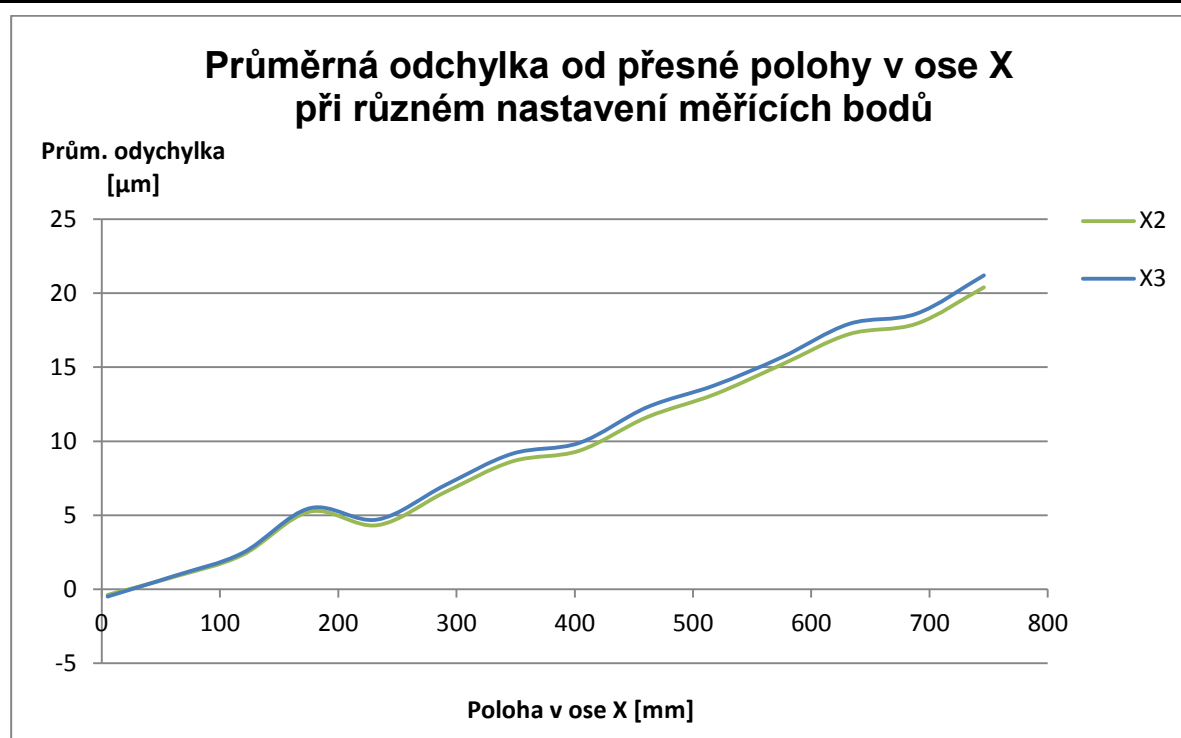
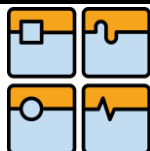
Obdobně jako v případě testování vlivu teploty budeme testovat rozdíl středních hodnot a rozptylů zmíněných datových souborů z měření X2 a X3. V Tab. 4.4 uvádíme výsledky parametrických testů pro jednotlivé polohy, ve kterých byl testován rozdíl středních hodnot a rozptylů naměřených odchylek od přesné polohy. Opět vyslovme nulovou hypotézu H_0 o shodě rozptylů těchto dvou statistických souborů.

Tab. 4.4: Výsledky parametrických testů pro datové soubory z měření X2 a X3

Poloha v X [mm]	F-Test	Významnost	T-Test	Významnost
5	0.904956	$p > 0,05(-)$	0.231135891	$p > 0,05(-)$
62	0.850016	$p > 0,05(-)$	0.605760052	$p > 0,05(-)$
119	0.539132	$p > 0,05(-)$	0.24064907	$p > 0,05(-)$
176	0.735021	$p > 0,05(-)$	0.008462632	$p < 0,05(+)$
233	0.289361	$p > 0,05(-)$	3.20811E-06	$p < 0,05(+)$
290	0.164218	$p > 0,05(-)$	2.98484E-08	$p < 0,05(+)$
347	0.009046	$p < 0,05(+)$	5.02406E-05	$p < 0,05(+)$
404	0.334957	$p > 0,05(-)$	0.000127478	$p < 0,05(+)$
461	0.79395	$p > 0,05(-)$	2.31953E-05	$p < 0,05(+)$
518	0.360365	$p > 0,05(-)$	0.000253806	$p < 0,05(+)$
575	0.867028	$p > 0,05(-)$	0.001996653	$p < 0,05(+)$
632	0.197311	$p > 0,05(-)$	2.79639E-05	$p < 0,05(+)$
689	0.688266	$p > 0,05(-)$	4.41763E-09	$p < 0,05(+)$
746	0.892924	$p > 0,05(-)$	1.44895E-08	$p < 0,05(+)$

Pro většinu bodů musíme zamítnout nulovou hypotézu o shodnosti středních hodnot statistických souborů, které reprezentují odchylky od zadaných poloh při měřeních X2 a X3. Nastavení počtu měřících bodů tedy dle tohoto testu ovlivnilo naměřené výsledky při těchto měřeních.

Následující Obr. 4.4 vyjadřuje závislost průměrné odchylky od přesné polohy v ose X při měřeních X2 a X3. Z tohoto grafu je patrné, že mírně příznivější z hlediska polohování bylo nastavení méně měřících bodů, tedy větší krok.



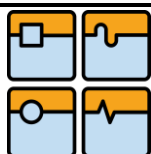
Obr. 4.4: Průměrné úchyly od přesné polohy v ose X při různém počtu kroků

Opět nutno poznamenat, že pro jednoznačné vyhodnocení bychom museli provést více měření, navíc nevíme, jakým způsobem se do těchto výsledků mohla projevit mírně odlišná teplota při obou měřeních, která byla jediným nestejným parametrem.

4.2.3 Vliv posuvové rychlosti

Téměř všechna měření v této práci byla provedena při zvolené posuvové rychlosti 1000mm/min. V závěru jsme však v ose X provedli měření, při kterých jsme posuvovou rychlost zvýšili třikrát a poté pětkrát. Tato měření, označená jako X4, X5 a X6 v Tab. 3.2 a Tab. 4.1, mají posuvové rychlosti 1000, 3000 a 5000 mm/min, přičemž tentokrát byl počet kroků vždy stejný, stroj tedy polohoval do totožných poloh. Změna teploty byla taktéž minimální, pro účely zjištění vlivu posuvové rychlosti ji zanedbáme. Cílem této změny posuvové rychlosti bylo prozkoumání vlivu nastavení tohoto parametru na naměřené výsledky.

Provedením těchto měření tedy získáme 3 soubory dat, reprezentující odchylky od přesné polohy v měřených bodech. Tyto soubory budeme testovat mezi sebou a porovnávat jejich střední hodnoty a rozptyly. Nulovou hypotézu H_0 opět formulujeme jako shodnost rozptylů zmíněných statistických souborů. Testujeme postupně mezi sebou měření X4 a X5, X4 a X6 a naposled X5 a X6. Vypočtené hodnoty a vyhodnocení parametrických testů uvádíme postupně v Tab. 4.5, Tab. 4.6 a Tab. 4.7.



Tab. 4.5: Výsledky parametrických testů pro datové soubory z měření X4 a X5

Poloha v X [mm]	F-Test	Významnost	T-Test	Významnost
100	0.1517	$p > 0,05(-)$	3E-05	$p < 0,05(+)$
200	0.2904	$p > 0,05(-)$	7E-12	$p < 0,05(+)$
300	0.0237	$p < 0,05(+)$	6E-13	$p < 0,05(+)$
400	0.552	$p > 0,05(-)$	4E-11	$p < 0,05(+)$
500	0.8328	$p > 0,05(-)$	3E-09	$p < 0,05(+)$
600	0.3888	$p > 0,05(-)$	8E-14	$p < 0,05(+)$

Tab. 4.6: Výsledky parametrických testů pro datové soubory z měření X4 a X6

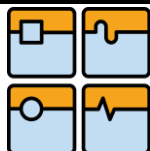
Poloha v X [mm]	F-Test	Významnost	T-Test	Významnost
100	0.0351	$p > 0,05(-)$	0.0001	$p < 0,05(+)$
200	0.7007	$p > 0,05(-)$	2E-07	$p < 0,05(+)$
300	0.0468	$p < 0,05(+)$	2E-09	$p < 0,05(+)$
400	0.8833	$p > 0,05(-)$	8E-08	$p < 0,05(+)$
500	0.2799	$p > 0,05(-)$	1E-07	$p < 0,05(+)$
600	0.8662	$p > 0,05(-)$	6E-10	$p < 0,05(+)$

Tab. 4.7: Výsledky parametrických testů pro datové soubory z měření X5 a X6

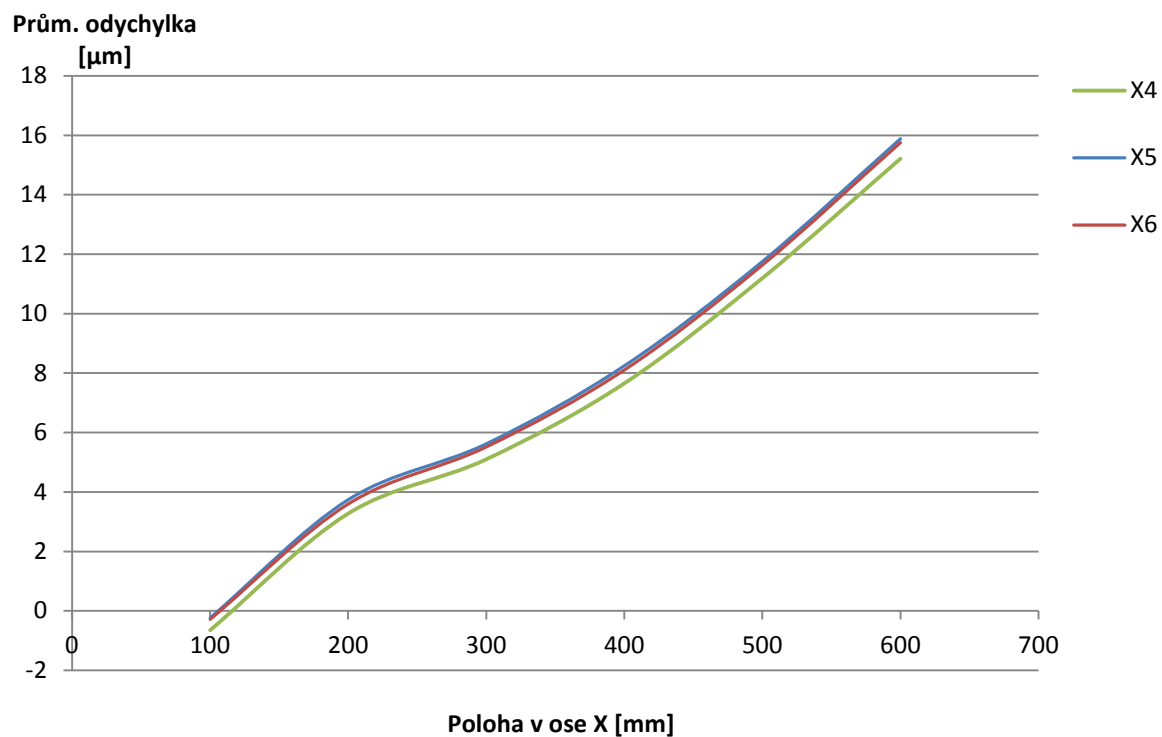
Poloha v X [mm]	F-Test	Významnost	T-Test	Významnost
100	0.4836	$p > 0,05(-)$	0.4634	$p > 0,05(-)$
200	0.4988	$p > 0,05(-)$	0.0027	$p < 0,05(+)$
300	0.7718	$p > 0,05(-)$	0.0061	$p < 0,05(+)$
400	0.6538	$p > 0,05(-)$	0.034	$p < 0,05(+)$
500	0.3832	$p > 0,05(-)$	0.0735	$p > 0,05(-)$
600	0.3038	$p > 0,05(-)$	0.0371	$p < 0,05(+)$

Obecně tedy zamítáme nulovou hypotézu o shodě středních hodnot uvedených statistických souborů, které reprezentují naměřené odchylky od zadané polohy při měřeních X4, X5 a X6. Změna posuvové rychlosti tedy měla vliv na naměřené výsledky odchylky.

Tento fakt můžeme pozorovat z následující závislosti průměrné odchylky v poloze pro jednotlivá měření X4, X5 a X6 na Obr. 4.5. Z grafu je patrné, že zvýšení posuvové rychlosti mělo negativní vliv na polohování podél osy. Zejména při prvním zvýšení rychlosti z 1000 na 3000 mm·min⁻¹ se zvýšila i odchylka v měřených polohách. Při dalším zvýšení z 3000 na 5000 mm·min⁻¹ je tento trend již méně patrný.



Průměrná odchylka od přesné polohy v ose X při různé posuvové rychlosti



Obr. 4.5: Průměrné úchytky od přesné polohy v ose X při různé posuvové rychlosti



5 Závěr

V úvodní části práce byla provedena rešerše v oblasti měření přesnosti a opakovatelnosti polohování. Rešerše vychází z norem a odborných článků, které se touto tematikou zabývají. V této části jsou také popsány principy metod měření a používaná měřící zařízení.

Těžištěm práce bylo proměřit přesnost a opakovatelnost nastavení polohy obráběcího centra MCV 754 QUICK Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky FSI VUT v Brně. Toto za účelem získání tří chybových parametrů nastavení polohy v jednotlivých osách, přičemž tyto parametry dále budou sloužit k vytvoření matematického popisu stroje ve spolupráci s Ústavem Matematiky FSI VUT v Brně, který nám může napovědět více o jeho chování. Některé vlastnosti stroje a jeho chování je totiž velmi složité předpokládat a tato chování jsou často v praxi převážně empirickou záležitostí.

Pomocí laser-interferometrického systému Renishaw XL-80 byla tedy za asistence vedoucího práce navržena a provedena série měření v osách X,Y,Z na tomto stroji a výsledky této série měření zpracovány pomocí programu Renishaw XCal-View. Provedená měření shrnuje Tab. 3.2, naměřené výsledky dle normy ISO 230-2 poté souhrnně zobrazuje Tab. 4.1.

Zároveň bylo jedním z cílů práce prověřit zvolenou metodu měření, zejména hodnotit faktory, které mají vliv na naměřené výsledky. Bylo zjištěno, že nastavení parametrů zkoušky, například zvolení počtu kroků, posuvová rychlost a okolní podmínky jako proměnná teplota, mohou mít zásadní vliv na naměřené výsledky.

Změna teploty se projevila zejména na výsledcích měření v ose Y. Nárůst teploty měl na přesnost příznivý vliv. Tento fakt může být způsobem tím, že nedošlo ke správnému teplotnímu ustálení stroje. Kompenzace stroje jsou stanoveny či přepočítávány na teplotu 20°C. Přestože jsme zaznamenali lepší polohování za zvyšující se teploty, údaje o teplotě stroje mohou být mírně zkreslené, jelikož měříme teplotu vzduchu a stroj se ještě nemusel teplotně ustálit. Například mohl být v prvním dnu měření delší dobu odstaven a jeho teplota mohla být nižší. Měření je také ovlivněno počtem měřicích bodů a délkou kroku. V ose X se zvýšení počtu měřicích bodů, tedy kratší krok mezi jednotlivými měřenými body, negativně projevil na přesnosti polohování v ose. Poslední zkoumaný faktor byl nastavení posuvové rychlosti. Zde jsme dospěli ke zjištění, že navýšení posuvové rychlosti mělo negativní vliv na přesnost polohování, a to zejména při zvýšení z 1000 mm·min⁻¹ na 3000 mm·min⁻¹.

Nutno podotknout, že k přesnějšímu zkoumání těchto vlivů by bylo vhodné provést více měření. Námi testovaná měření také často neměla vzájemně shodné parametry. Pro prověření vlivu jednotlivých zásahů do měření jsme proto vybrali ta měření, která se nejvíce shodovala a byla vhodná pro zmíněné testování. V této souvislosti navrhuji pro příští měření dbát na dodržení shodných parametrů jednotlivých měření a provádět měření se zvolením stejného měřeného rozsahu v ose a sudým počtem kroků. Tím by stroj polohoval do stejných poloh a odchylky v těchto polohách bylo možno lépe porovnávat.

6 Seznamy

6.1 Seznam obrázků

Obr. 2.1: Vysvětlení pojmů v oblasti přesnosti polohování [2].....	11
Obr. 2.2: Srovnání opakovatelnosti a přesnosti polohovacího systému [4].....	12
Obr. 2.3: Standardní zkušební cyklus dle ČSN 230-2 [6].....	14
Obr. 2.4: Sestavení měřicího systému pro diagonální test dle ČSN ISO 230-6 [7]...	15
Obr. 2.5: Trajektorie paprsku laseru při diagonálním testu [7].....	15
Obr. 2.6: Měřicí body diagonálního testu [7]	15
Obr. 2.7: Porovnání ideálního a nedokonalého polohování ve 2D [7]	16
Obr. 2.8: Měřicí body při krokovém diagonálním testu [11].....	17
Obr. 2.9: Schéma průběhu krokového diagonálního testu [11]	17
Obr. 2.10: Znázornění chyby nastavení referenčního zrcadla [11].....	18
Obr. 2.11: Schéma principu měření založeného na Dopplerově jevu [12]	20
Obr. 2.12: Laserový kalibrační systém Optodyne LDS-2000 [14]	20
Obr. 2.13: Schéma a princip Michelsonova laserového interferometru [15].....	21
Obr. 2.14: LaserTracker firmy Faro Technologies [18].....	22
Obr. 2.15: Schéma Laser Trackeru [16]	22
Obr. 3.1: Vertikální obráběcí centrum KOVOSVIT MCV 754 QUICK [21].....	24
Obr. 3.2: Pracovní prostor stroje KOVOSVIT MCV 754 QUICK [21].....	24
Obr. 3.3: Umístění teplotního snímače Testo Saveris pro osu Z.....	25
Obr. 3.4: Umístění teplotního snímače Testo Saveris pro osu X	25
Obr. 3.5: Schéma a klíčové komponenty laserového systému Renishaw XL-80 [19]	25
Obr. 3.6: Laserová hlavice XL-80 [19].....	26
Obr. 3.7: Kompenzátor XC-80 a snímače okolního prostředí [19].....	26
Obr. 3.8: Zaměřovač paprsku [19]	26
Obr. 3.9: Princip lineárního měření systémem Renishaw XL-80 [22].....	27
Obr. 3.10: Schéma zapojení laserového systému Renishaw XL-80 [22]	27
Obr. 3.11: Indikace signálu laserové hlavice.....	30
Obr. 3.12: Schéma cesty paprsku v ose Z	31
Obr. 3.13: Schéma cesty paprsku v ose Y	32
Obr. 3.14: Schéma cesty paprsku v ose X.....	32
Obr. 3.15: Prostředí programu Renishaw LaserXL Capture.....	33
Obr. 3.16: Okno nastavování měřících bodů v Renishaw LaserXI Capture	34
Obr. 4.1: Náhled vyhodnocení testu v programu Renishaw XCal-View v2.1	36
Obr. 4.2: Ukázka tendence grafu závislosti úchyly polohy na poloze v ose	38
Obr. 4.3: Průměrné úchyly od přesné polohy v ose Y za různých teplot.....	42
Obr. 4.4: Průměrné úchyly od přesné polohy v ose X při různém počtu kroků.....	44
Obr. 4.5: Průměrné úchyly od přesné polohy v ose X při různé posuvové rychlosti	46

6.2 Seznam tabulek

Tab. 2.1: Souhrn norem zabývajících se přesností polohování [5].....	12
Tab. 2.2: Porovnání klíčových parametrů norem ISO 230-2 a VDI/DQG 3341 [5]	13
Tab. 2.3: Příklad srovnání jednotlivých měření ve 3D [7]	17
Tab. 2.4: Srovnání zástupců laserových měřících systémů [14, 19, 20]	22
Tab. 3.1: Technické parametry MCV 754 QUICK KOVOSVIT MAS a.s. [21].....	24
Tab. 3.2: Tabulka shrnující veškerá provedená měření a jejich parametry	35
Tab. 4.1: Výsledky měření přesnosti a opakovatelnosti polohování dle ISO 230-2...37	
Tab. 4.2: Rozdíly teplot ze dvou měřících dnů	41
Tab. 4.3: Odchyly od polohy 575 mm při měřeních X1 a X2 a parametrické testy ..	41
Tab. 4.4: Výsledky parametrických testů pro datové soubory z měření X2 a X3.....	43
Tab. 4.5: Výsledky parametrických testů pro datové soubory z měření X4 a X5.....	45
Tab. 4.6: Výsledky parametrických testů pro datové soubory z měření X4 a X6.....	45
Tab. 4.7: Výsledky parametrických testů pro datové soubory z měření X5 a X6.....	45

6.3 Seznam rovnic

(2.1) Volba měřících bodů.....	14
(2.2) Změna frekvence odraženého laserového paprsku 1	19
(2.3) Změna frekvence odraženého laserového paprsku 2	19
(2.4) Změna fáze laserového paprsku.....	19
(2.5) Přestavení reflektoru LDDM systému	19
(4.1) Výpočet rozptylu 1	39
(4.2) Výpočet rozptylu 2	39
(4.3) Výpočet počtu stupňů volnosti 1	39
(4.4) Výpočet počtu stupňů volnosti 2	39
(4.5) Nulová hypotéza	39
(4.6) Výpočet testového kritéria.....	40

6.4 Seznam příloh

Na přiloženém CD:


- elektronická verze bakalářské práce
- datový soubor ve formátu .xls s porovnáním jednotlivých měření
- jednotlivé datové soubory ve formátu .mpf

Tištěná verze:

- naměřená data a grafy jednotlivých měření

6.5 Seznam použité literatury

- [1] BACH, P.; SVOBODA, O.; VYROUBAL, J. Zkoušky přesnosti obráběcích strojů. *Machining & Tooling Magazine* [online]. 2010, 2/2010, [cit. 2011-12-13]. Dostupný z : <[http:// http://infocube.cz/cs/machining-tooling-magazine-22010/?menu_name=menu-mtm](http://http://infocube.cz/cs/machining-tooling-magazine-22010/?menu_name=menu-mtm)>.
- [2] SLOCUM, Alexander H. *Precision machine design*. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, c1992, xvi, 750 s. ISBN 01-369-0918-3.
- [3] BRAVENEC, Libor. *Polohování CNC frézky dle normy ISO 230-2*. Zlín, 2012. Dostupné z: http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/23058/bravenec_2012_dp.pdf?sequence=1. Diplomová práce. UTB Zlín. Vedoucí práce doc.Dr.Ing. Vladimír Pata.
- [4] MCCARTHY, Kevin. *Accuracy in positioning systems* [online]. New England Affiliated Technologies, 2007 [cit. 2011-12-22]. Dostupné z: http://www.danahermotion.com/education/learn_about_mc/mchandbook/pdf/accuracy.pdf.
- [5] MULLANY, Brigid. *Evaluation and comparison of the different standards used to define the positional accuracy and repeatability of numerically controlled machining center axes* [online]. Charlotte, 2007. 26 s. Oborová práce. University of North Carolina. Dostupné z WWW: <http://www.amtonline.org/article_display.cfm?article_id=63300&ion_id=28>.
- [6] ČSN ISO 230-2. *Zásady zkoušek obráběcích strojů : Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 36 s.
- [7] RENISHAW PLC. *Laser diagonal tests*. 2004.
- [8] CHAPMAN, Mark A.V. Limitations of laser diagonal measurements. *Precision Engineering*. 2003, vol. 27, issue 4, s. 401-406. DOI: 10.1016/S0141-6359(03)00041-2. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635903000412>
- [9] WANG, Charles. Laser vector measurement technique for the determination and compensation of volumetric positioning errors. Part I: Basic theory. *Review of Scientific Instruments*. 2000, vol. 71, issue 10, s. 3933-. DOI: 10.1063/1.1290504. Dostupné z: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/rsi/71/10/10.1063/1.1290504> [10] WANG, Charles and Via VENETO. A laser Non-contact Measurement of Static Positioning and Dynamic Contouring Accuracy of a CNC Machine tool. no date, pp. 1–11.
- [11] RENISHAW PLC. *Laser step diagonal tests*. 2006.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 51
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

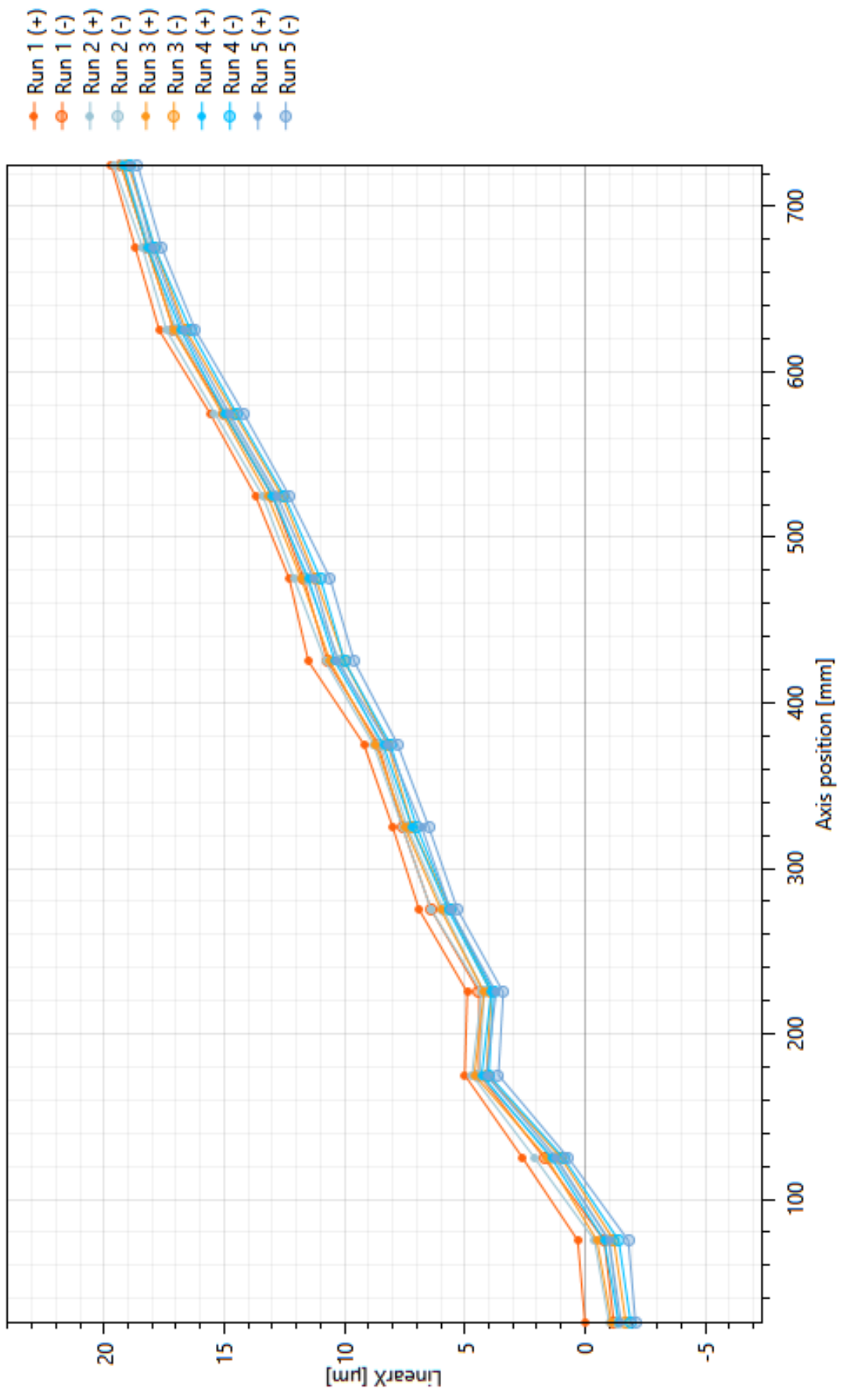
- [12] WANG. Laser Doppler Displacement Measurement. 1881.
- [13] OPTODYNE LASER METROLOGY. *LDS-1000 Positioning System*. Milán, Itálie, 1998. Dostupné z: www.optodyne.it
- [14] OPTODYNE LASER METROLOGY. *LDS-2000 Laser Doppler Scale*. Compton, CA, USA, 2002. Dostupné z: www.optodyne.com.
- [15] ČÍP, Ondřej a Zdeněk BUCHTA. *Přesné měření délek pomocí laserové interferometrie*. Brno, 2011. Učební texty k semináři. VUT Brno.
- [16] KNOBLOCH, J. Mapování geometrických chyb v pracovním prostoru obráběcího stroje. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 80 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Holub.
- [17] ETALON APPLIED TRACEABILITY. *TRAC-CHECK Manual*. Braunschweig, Německo, 2011.
- [18] GOKHALE, Amrita. All-New FARO launches all-new Laser Tracker Vantage. In: *IPF Online* [online]. 2012 [cit. 2014-05-23]. Dostupné z: <http://www.ipfonline.com/IPFCONTENT/news/industry-news/all-new-faro-launches-all-new-laser-tracker-vantage.php>
- [19] RENISHAW PLC. *Laserový systém XL-80*. Gloucestershire, Velká Británie, 2007. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/laserovy-interferometr-xl-80--8268#tocTarget3>
- [20] FARO. *FARO Laser Tracker ION*. Owings Mills, MD, USA, 2009. Dostupné z: <http://www.faro.com/en-us/products/metrology/faro-laser-tracker/overview>
- [21] KOVOSVIT MAS, a.s. *MCV Line - Vertikální obráběcí centra*. Sezimovo Ústí, 2009. Dostupné z: <http://www.kovosvit.cz/upload/products/pdf/mcv-754-quick-1384869927.pdf>
- [22] RENISHAW PLC. *Laser system manual: Linear measurement*. Gloucestershire, Velká Británie, 2007. Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/system-manuals--7107>
- [23] RENISHAW PLC. *XCal-View data analysis software*. Gloucestershire, Velká Británie, 2010. Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/xcal-view-data-analysis-software--21826#ElementMediaList54104>
- [24] Parametrické testy. *Statistika a informatika - přednášky VFU Brno* [online]. 2007 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://cit.vfu.cz/statwelf/WELF/prednasky.htm>

Příloha

Naměřená data a grafy z jednotlivých měření

Měření X1: Osa X, 15 měřících bodů, 1000 mm/min, Datum 11.3.2014

Poloha [mm]	Odchylka [μm]									
	Run1(+)	Run1(-)	Run2(+)	Run2(-)	Run3(+)	Run3(-)	Run4(+)	Run4(-)	Run5(+)	Run5(-)
25	0	-1.2	-1	-1.4	-1.1	-1.7	-1.4	-1.9	-1.5	-2.1
75	0.3	-0.8	-0.4	-1	-0.5	-1.2	-0.8	-1.4	-1	-1.8
125	2.6	1.7	2.1	1.3	1.6	1	1.4	0.9	1.2	0.7
175	5	4.4	4.7	4.4	4.6	4.1	4.3	4	4.1	3.6
225	4.9	4.4	4.3	4.2	4.2	3.9	3.9	3.8	3.7	3.4
275	6.9	6.4	6.4	5.9	6	5.6	5.7	5.6	5.6	5.3
325	8	7.6	7.6	7.4	7.5	7.2	7.2	7	6.8	6.5
375	9.2	8.6	8.8	8.5	8.7	8.2	8.4	8.1	8.2	7.8
425	11.5	10.7	10.8	10.2	10.6	10	10.4	10	10.3	9.6
475	12.3	11.7	12.1	11.6	11.8	11.2	11.5	11	11.3	10.6
525	13.7	13	13.4	12.9	13.2	12.6	13	12.5	12.8	12.3
575	15.6	15	15.4	14.9	15.1	14.6	15	14.5	14.8	14.2
625	17.7	17.1	17.4	17	17.1	16.6	16.8	16.4	16.7	16.2
675	18.7	18.2	18.4	18.1	18.2	17.9	18.2	17.9	18	17.6
725	19.7	19.3	19.6	19.2	19.3	19	19.2	18.9	18.9	18.6

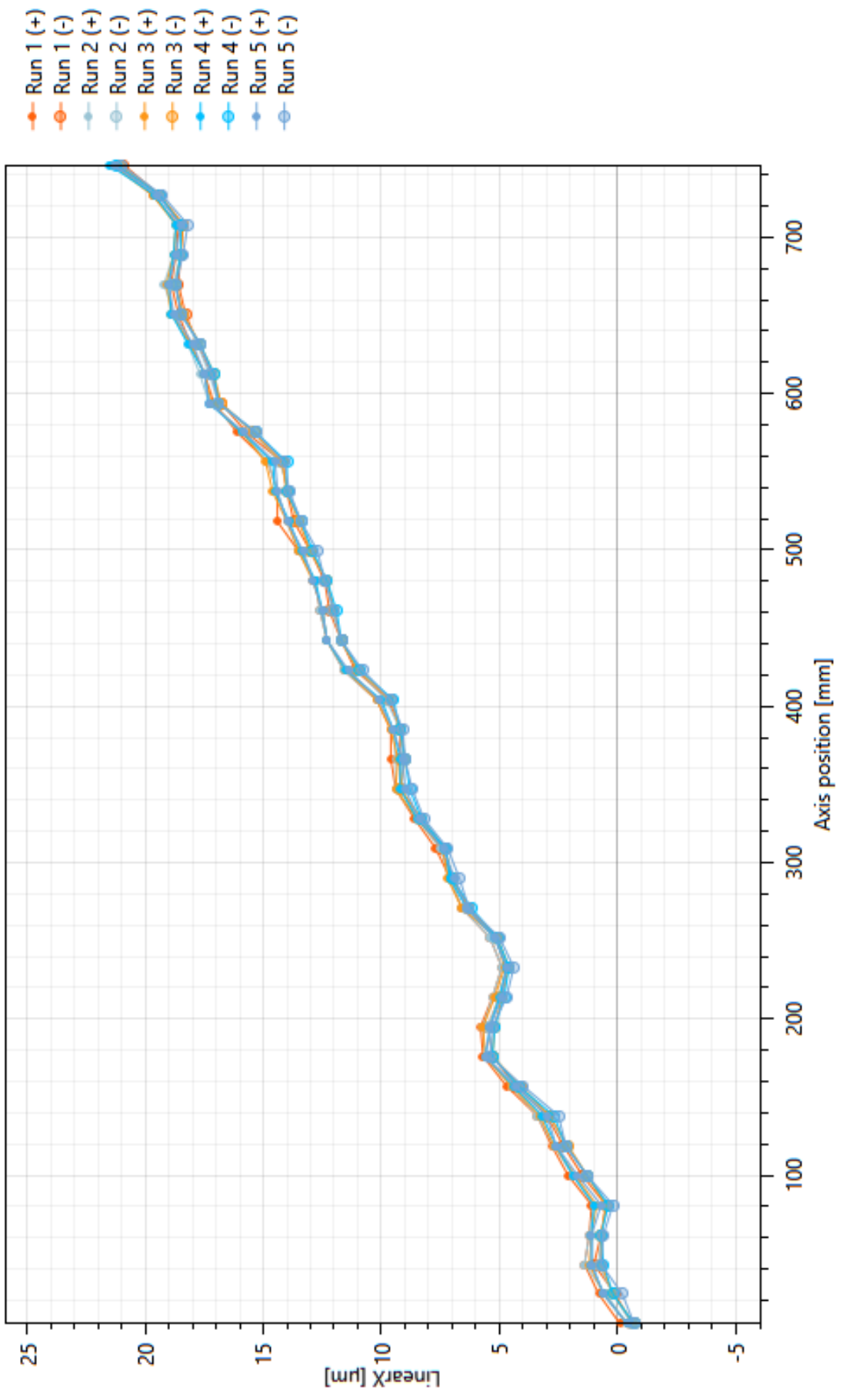


Měření X2: Osa X, 14 měřících bodů, 1000 mm/min, Datum 2.4.2014

Poloha [mm]	Odchylka [μm]									
	Run1(+)	Run1(-)	Run2(+)	Run2(-)	Run3(+)	Run3(-)	Run4(+)	Run4(-)	Run5(+)	Run5(-)
5	0	-0.4	-0.2	-0.6	-0.4	-0.5	-0.3	-0.5	-0.3	-0.7
62	1.2	0.7	1	0.7	1.1	0.7	1.1	0.6	1	0.4
119	2.5	2.3	2.6	2.3	2.6	2.2	2.3	2	2.3	2
176	5.6	5.3	5.5	5.2	5.2	5.1	5.2	5	5.2	5.1
233	4.5	4.3	4.2	4.2	4.3	4.2	4.4	4.3	4.4	4.4
290	6.4	6.5	6.5	6.5	6.6	6.6	6.6	6.5	6.7	6.5
347	8.6	8.6	8.7	8.5	8.5	8.6	8.7	8.6	8.8	8.7
404	9.4	9.1	9.4	9.1	9.5	9.3	9.6	9.2	9.7	9.3
461	11.5	11.2	11.7	11.4	11.9	11.5	12	11.6	11.9	11.5
518	13.2	12.9	13.3	12.9	13.3	12.9	13.4	12.9	13.6	13.2
575	15.1	14.7	15.2	14.8	15.3	15	15.6	15.2	15.7	15.2
632	16.9	16.6	17.4	17	17.5	17.2	17.7	17.4	17.5	17.2
689	17.9	17.7	18	17.8	18.1	17.9	18.1	17.9	18.1	17.9
746	20.5	20.2	20.6	20.3	20.5	20.2	20.5	20.2	20.7	20.3

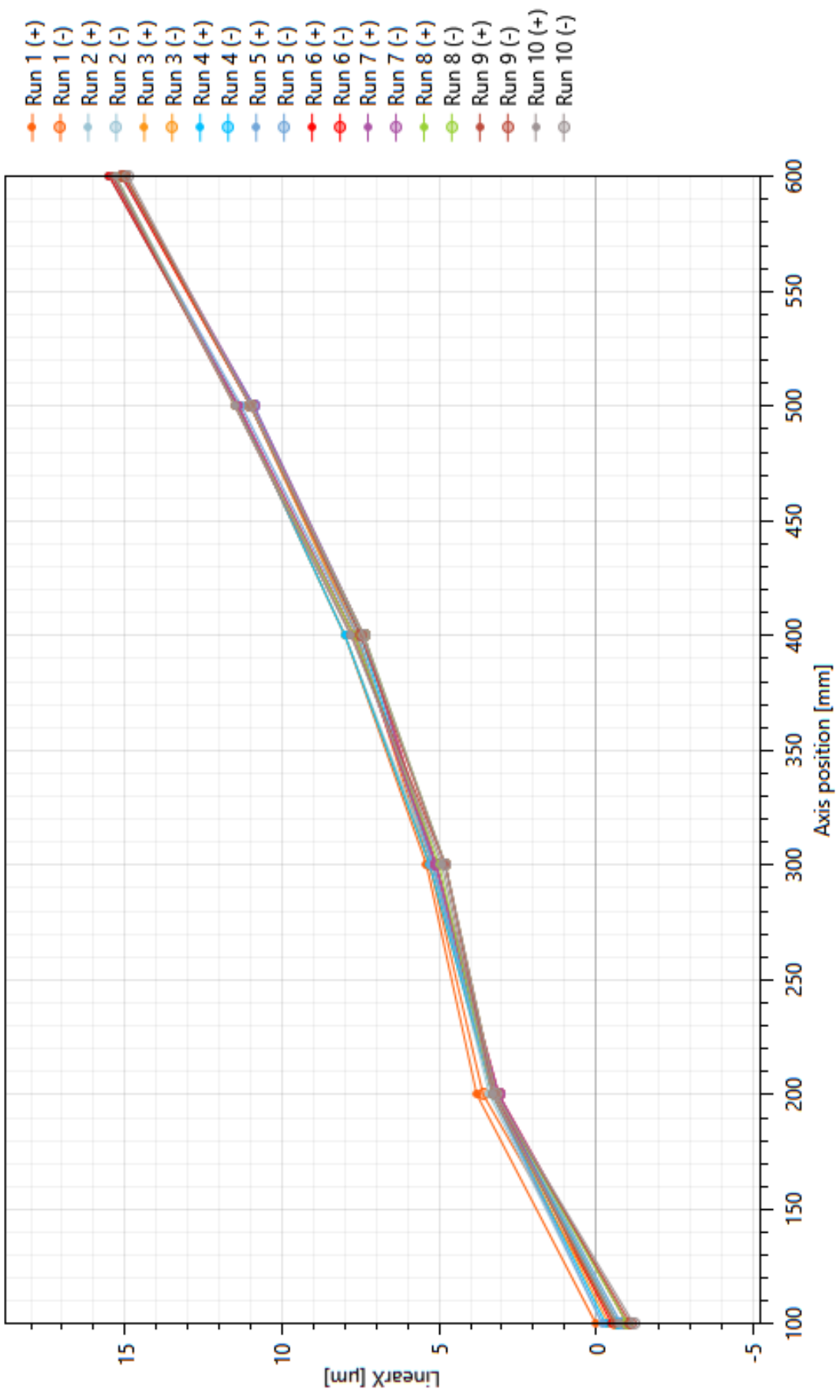
Měření X3: Osa X, 40 měřících bodů, 1000 mm/min, Datum 2.4.2014

Poloha [mm]	Odchylka [μm]									
	Run1(+)	Run1(-)	Run2(+)	Run2(-)	Run3(+)	Run3(-)	Run4(+)	Run4(-)	Run5(+)	Run5(-)
5	-0.1	-0.6	-0.4	-0.6	-0.4	-0.7	-0.4	-0.7	-0.4	-0.7
24	0.8	0.1	0.5	0.2	0.6	0.2	0.6	0.2	0.6	-0.2
43	1.4	1	1.4	0.8	1.2	0.7	1.1	0.6	1.1	0.7
62	1.2	0.7	1.2	0.7	1.1	0.7	1.1	0.7	1.1	0.6
81	1.1	0.5	1	0.4	0.9	0.5	1	0.4	0.7	0.2
100	2.1	1.5	1.9	1.3	1.8	1.3	1.9	1.3	1.7	1.3
119	2.8	2.3	2.7	2.2	2.7	2.1	2.6	2.2	2.6	2.2
138	3.4	3	3.4	2.9	3.3	2.9	3.2	2.7	3	2.5
157	4.7	4.3	4.5	4.2	4.5	4.1	4.4	4.2	4.3	4
176	5.7	5.3	5.6	5.3	5.6	5.3	5.6	5.3	5.6	5.4
195	5.8	5.5	5.7	5.5	5.7	5.2	5.4	5.2	5.4	5.3
214	5.3	5	5.3	5	5.2	4.9	5	4.8	4.9	4.7
233	4.9	4.7	4.9	4.7	4.8	4.6	4.7	4.6	4.7	4.4
252	5.4	5.2	5.4	5.2	5.1	5.1	5.2	5.1	5.2	5
271	6.6	6.3	6.6	6.4	6.6	6.3	6.4	6.2	6.4	6.3
290	7.1	7	7.1	7	7.2	7	7.1	7	6.9	6.7
309	7.7	7.5	7.5	7.3	7.4	7.3	7.3	7.3	7.4	7.2
328	8.6	8.4	8.5	8.4	8.5	8.3	8.5	8.3	8.4	8.2
347	9.4	9.2	9.4	9.2	9.4	9.2	9.2	8.8	9	8.7
366	9.6	9.2	9.4	9.1	9.3	9	9.2	9	9.1	9
385	9.6	9.2	9.5	9.2	9.6	9.2	9.5	9.2	9.5	9.1
404	10.2	9.7	10.2	9.8	10.2	9.6	10	9.5	10.1	9.6
423	11.6	11.1	11.6	11	11.5	11	11.5	10.9	11.4	10.8
442	12.3	11.7	12.3	11.7	12.3	11.7	12.3	11.7	12.3	11.7
461	12.6	12.2	12.6	12.1	12.5	12	12.5	11.9	12.5	12
480	12.8	12.4	12.8	12.3	12.9	12.3	12.8	12.3	12.9	12.4
499	13.5	13	13.5	13	13.5	13	13.4	12.9	13.3	12.7
518	14.4	13.7	14	13.4	14	13.5	13.9	13.4	14	13.4
537	14.4	14	14.4	13.9	14.6	14	14.5	14	14.4	13.9
556	14.8	14.2	14.8	14.3	14.9	14.2	14.6	14	14.5	14.1
575	16.1	15.7	15.9	15.4	15.9	15.4	15.9	15.3	15.8	15.3
594	17.1	16.8	17.3	16.9	17.2	16.8	17.3	16.9	17.3	16.9
613	17.5	17.2	17.7	17.3	17.5	17.1	17.5	17.1	17.5	17.2
632	18.1	17.8	18.2	17.8	18.1	17.7	18.2	17.7	18	17.7
651	18.6	18.3	18.8	18.4	18.9	18.4	18.9	18.5	18.8	18.5
670	18.9	18.6	19.2	18.8	19.1	18.7	19	18.7	19	18.7
689	18.7	18.5	18.8	18.5	18.8	18.5	18.8	18.5	18.7	18.4
708	18.6	18.4	18.7	18.5	18.7	18.4	18.7	18.5	18.5	18.2
727	19.7	19.4	19.6	19.4	19.7	19.4	19.6	19.4	19.5	19.3
746	21.2	20.9	21.4	21.1	21.4	21.1	21.5	21.2	21.3	21



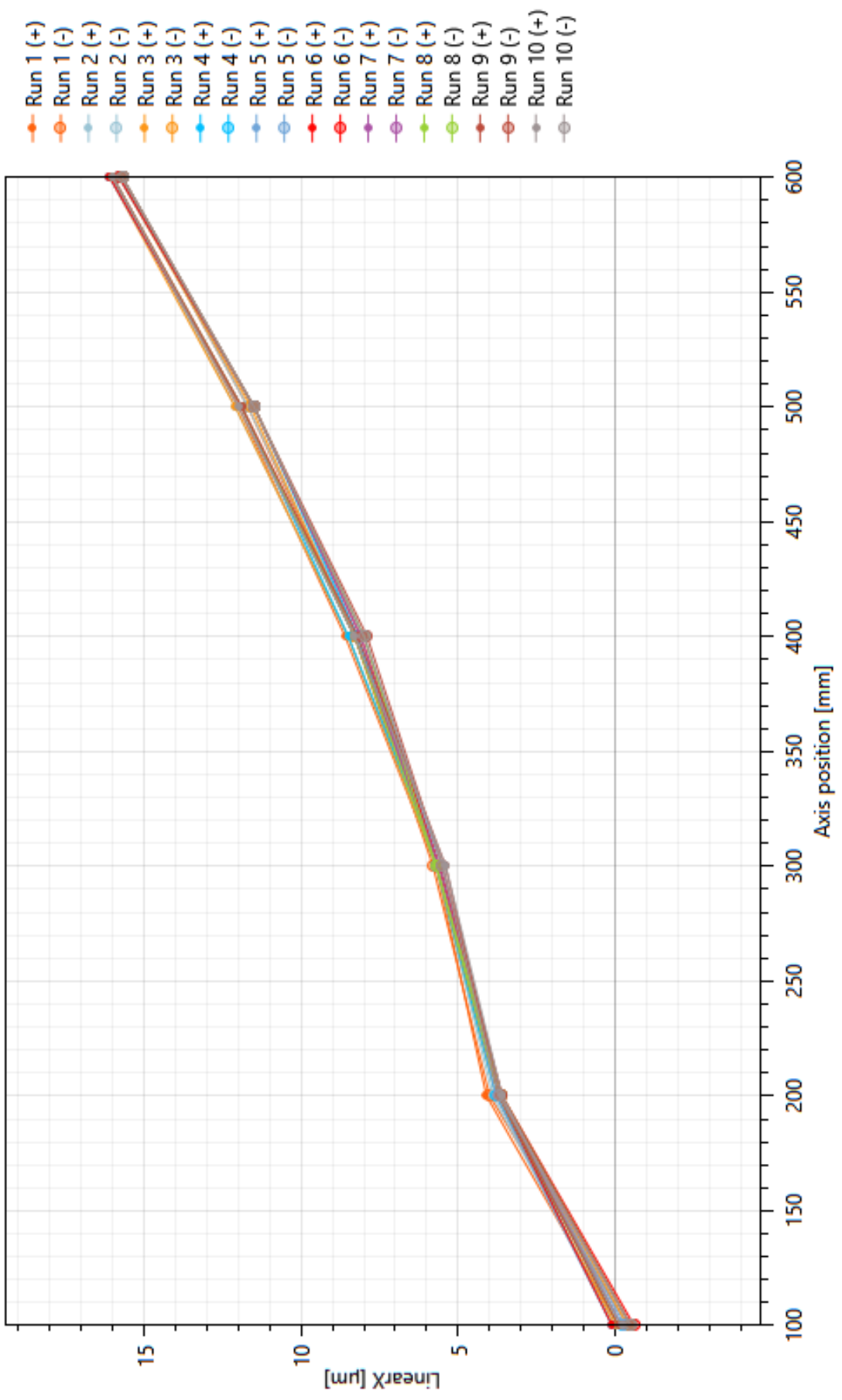
Měření X4: Osa X, 6 měřících bodů, 1000 mm/min, Datum 2.4.2014

Poloha [mm]		100	200	300	400	500	600
Odchyška [μm]	Run1(+)	0	3.8	5.4	8	11.4	15.4
	Run1(-)	-0.6	3.6	5.3	7.6	11	15
	Run2(+)	-0.2	3.4	5.2	8	11.4	15.3
	Run2(-)	-0.8	3.2	5.2	7.6	11	15
	Run3(+)	-0.4	3.3	5.3	8	11.4	15.5
	Run3(-)	-0.7	3.2	5.2	7.6	11	15.1
	Run4(+)	-0.3	3.3	5.3	8	11.4	15.5
	Run4(-)	-0.7	3.2	5.2	7.5	10.9	15.1
	Run5(+)	-0.2	3.3	5.2	7.6	11.3	15.4
	Run5(-)	-0.8	3.1	5.2	7.4	10.9	15.1
	Run6(+)	-0.5	3.2	5.1	7.7	11.4	15.5
	Run6(-)	-1	3.1	5.1	7.4	11	15.1
	Run7(+)	-0.6	3.2	5.1	7.7	11.4	15.4
	Run7(-)	-1	3.1	5.1	7.4	10.9	15
	Run8(+)	-0.6	3.3	5	7.7	11.5	15.3
	Run8(-)	-1	3.2	4.8	7.4	11	15
	Run9(+)	-0.6	3.3	4.8	7.8	11.5	15.4
	Run9(-)	-1.1	3.2	4.8	7.5	11	15
	Run10(+)	-0.7	3.3	4.9	7.8	11.5	15.3
	Run10(-)	-1.2	3.2	4.8	7.4	11	14.9



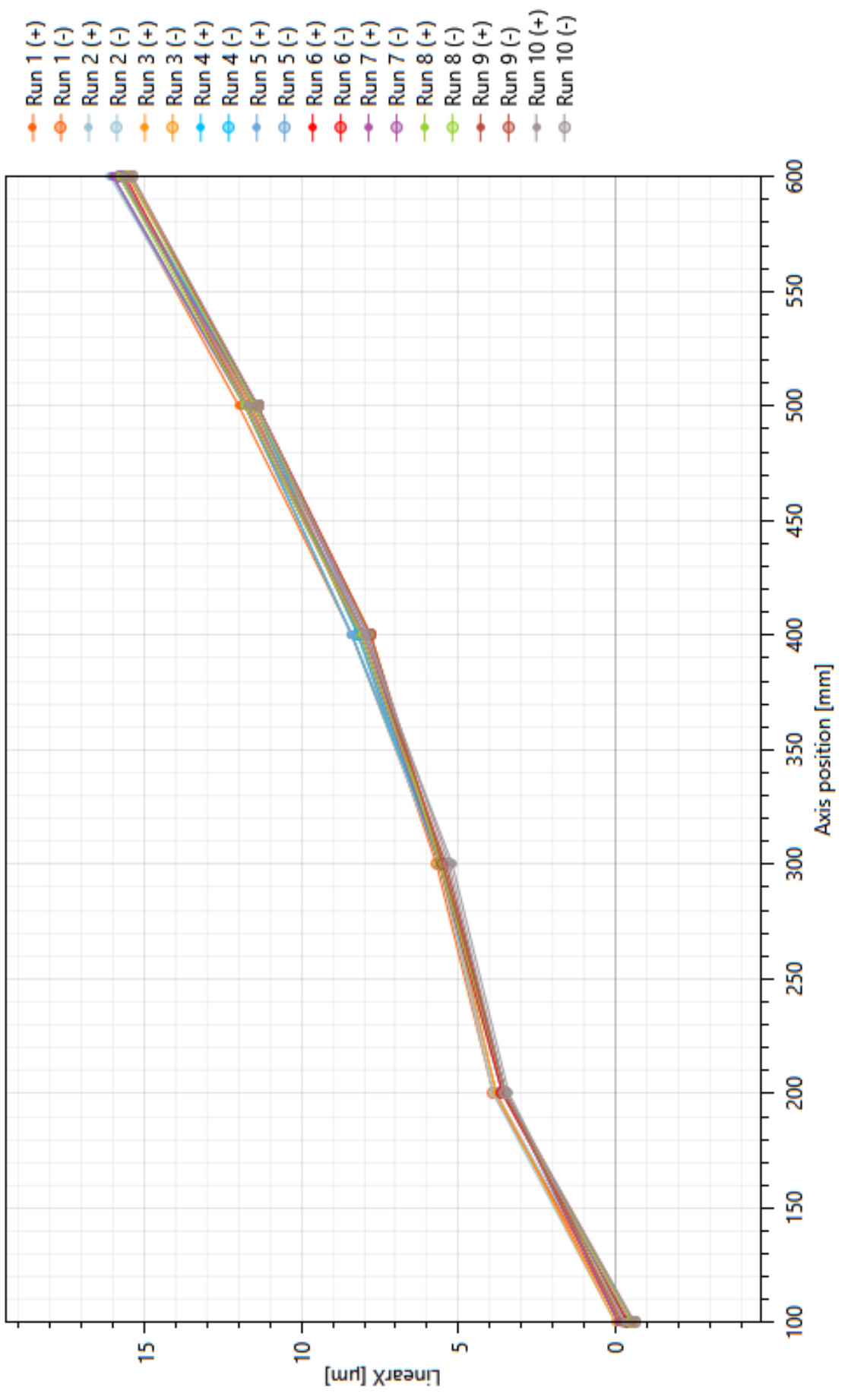
Měření X5: Osa X, 6 měřících bodů, 3000 mm/min, Datum 2.4.2014

Poloha [mm]		100	200	300	400	500	600
Odhylka [μm]	Run1(+)	-0.1	4.1	5.7	8.6	12	16
	Run1(-)	-0.4	4	5.8	8.3	11.7	15.7
	Run2(+)	0	3.9	5.7	8.5	12.1	16
	Run2(-)	-0.4	3.7	5.7	8.2	11.7	15.7
	Run3(+)	0	3.8	5.7	8.5	12.1	16.1
	Run3(-)	-0.4	3.7	5.7	8.3	11.6	15.8
	Run4(+)	0.1	3.7	5.6	8.5	11.9	16.1
	Run4(-)	-0.2	3.8	5.7	8.2	11.5	15.8
	Run5(+)	0.1	3.8	5.5	8.3	11.9	16.1
	Run5(-)	-0.3	3.7	5.6	8	11.5	15.7
	Run6(+)	0.1	3.7	5.6	8.3	11.9	16.1
	Run6(-)	-0.6	3.6	5.6	8.1	11.5	15.8
	Run7(+)	-0.2	3.7	5.6	8.3	11.9	16
	Run7(-)	-0.5	3.7	5.7	8.1	11.5	15.7
	Run8(+)	-0.1	3.7	5.7	8.3	11.9	16
	Run8(-)	-0.5	3.6	5.7	8	11.5	15.7
	Run9(+)	-0.1	3.7	5.4	8.2	11.9	16
	Run9(-)	-0.5	3.6	5.5	7.9	11.5	15.7
	Run10(+)	-0.2	3.6	5.4	8.3	12	16
	Run10(-)	-1.2	3.2	4.8	7.4	11	14.9



Měření X6: Osa X, 6 měřících bodů, 5000 mm/min, Datum 2.4.2014

Poloha [mm]		100	200	300	400	500	600
Odchyška [μm]	Run1(+)	-0.1	3.8	5.6	8.4	12	16
	Run1(-)	-0.3	3.9	5.7	8.2	11.6	15.7
	Run2(+)	0	3.9	5.6	8.4	11.8	16.1
	Run2(-)	-0.3	3.8	5.6	8.1	11.5	15.8
	Run3(+)	0	3.8	5.5	8.4	11.8	16
	Run3(-)	-0.4	3.6	5.5	8.1	11.5	15.7
	Run4(+)	-0.1	3.5	5.5	8.4	11.8	16
	Run4(-)	-0.4	3.6	5.6	8.2	11.5	15.7
	Run5(+)	-0.1	3.5	5.4	8.4	11.8	16
	Run5(-)	-0.5	3.5	5.5	8	11.4	15.7
	Run6(+)	-0.1	3.5	5.5	8.1	11.8	15.6
	Run6(-)	-0.4	3.6	5.6	7.8	11.4	15.5
	Run7(+)	-0.1	3.5	5.6	8.1	11.8	16
	Run7(-)	-0.5	3.5	5.6	7.9	11.5	15.8
	Run8(+)	-0.2	3.5	5.5	8.1	11.8	15.8
	Run8(-)	-0.5	3.5	5.6	7.8	11.5	15.5
	Run9(+)	-0.2	3.5	5.4	8	11.7	15.7
	Run9(-)	-0.6	3.5	5.5	7.8	11.4	15.4
	Run10(+)	-0.3	3.4	5.2	8	11.7	15.7
	Run10(-)	-0.6	3.5	5.3	7.9	11.4	15.4

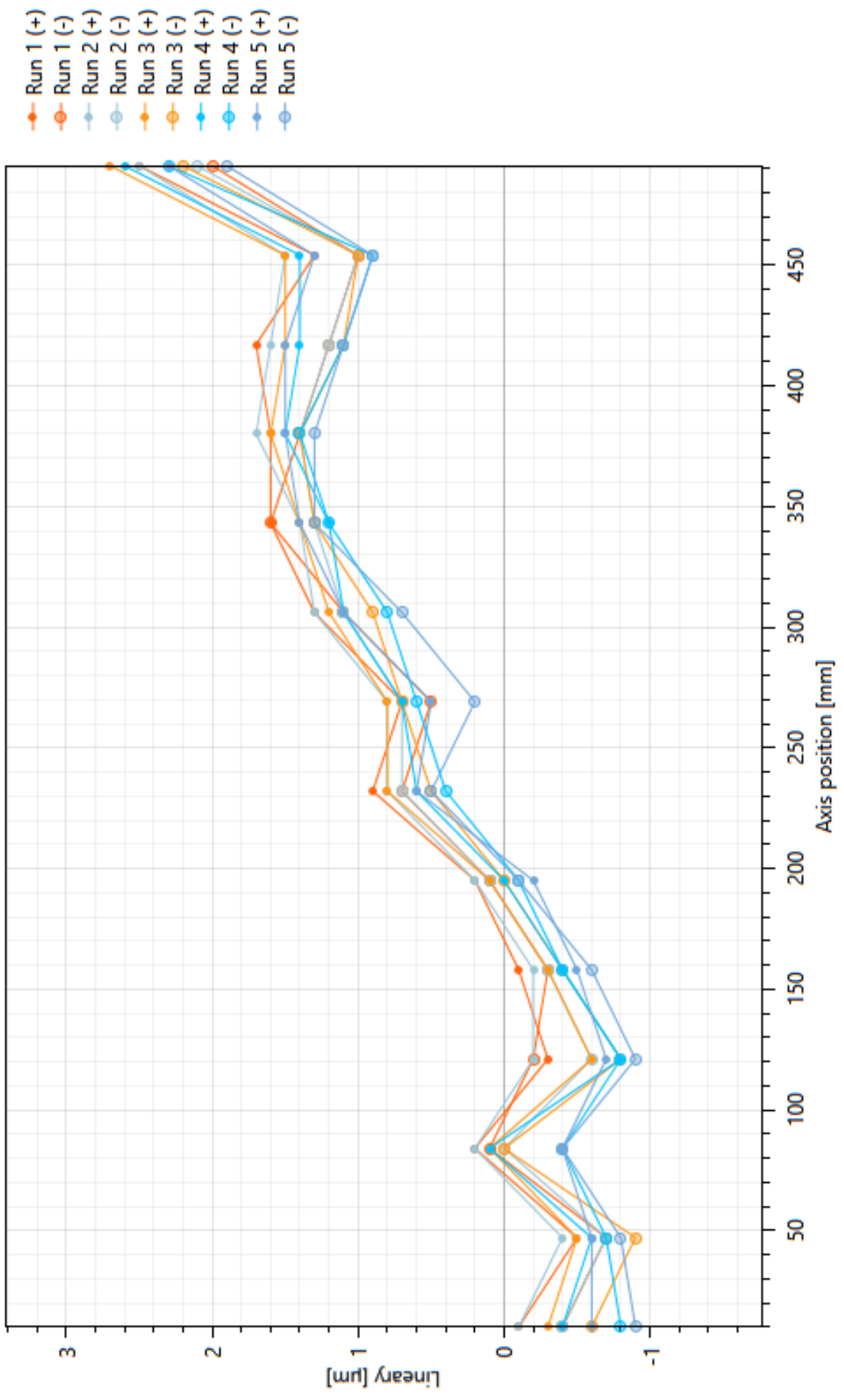


Měření Y1: Osa Y, 10 měřících bodů, 1000 mm/min, Datum 11.3.2014

Poloha [mm]	Odchylka [μm]									
	Run1(+)	Run1(-)	Run2(+)	Run2(-)	Run3(+)	Run3(-)	Run4(+)	Run4(-)	Run5(+)	Run5(-)
25	-0.2	-1.6	-1.3	-2.1	-1.8	-2.8	-2.5	-3.4	-3.1	-3.8
75	-0.7	-1.5	-1.3	-1.8	-1.6	-2.5	-2.3	-3.1	-2.8	-3.4
125	-0.5	-1.6	-1.5	-2.1	-1.8	-2.5	-2.2	-3.2	-2.8	-3.6
175	0.7	-0.5	-0.3	-0.9	-0.6	-1.6	-1.2	-2.2	-1.9	-2.5
225	0.8	-0.3	-0.1	-0.8	-0.4	-1.3	-1.1	-2	-1.7	-2.4
275	1.4	0.4	0.7	0	0.3	-0.5	-0.5	-1.3	-1	-1.5
325	2.8	1.8	1.9	1.3	1.7	0.6	0.9	-0.1	0.6	-0.3
375	2.7	1.9	2	1.5	1.7	1	0.9	0.3	0.5	0
425	3	2.2	2.3	1.8	1.9	1.4	1.1	0.5	0.7	0.1
475	3.8	2.9	3.1	2.6	2.8	2.2	2	1.4	1.6	1

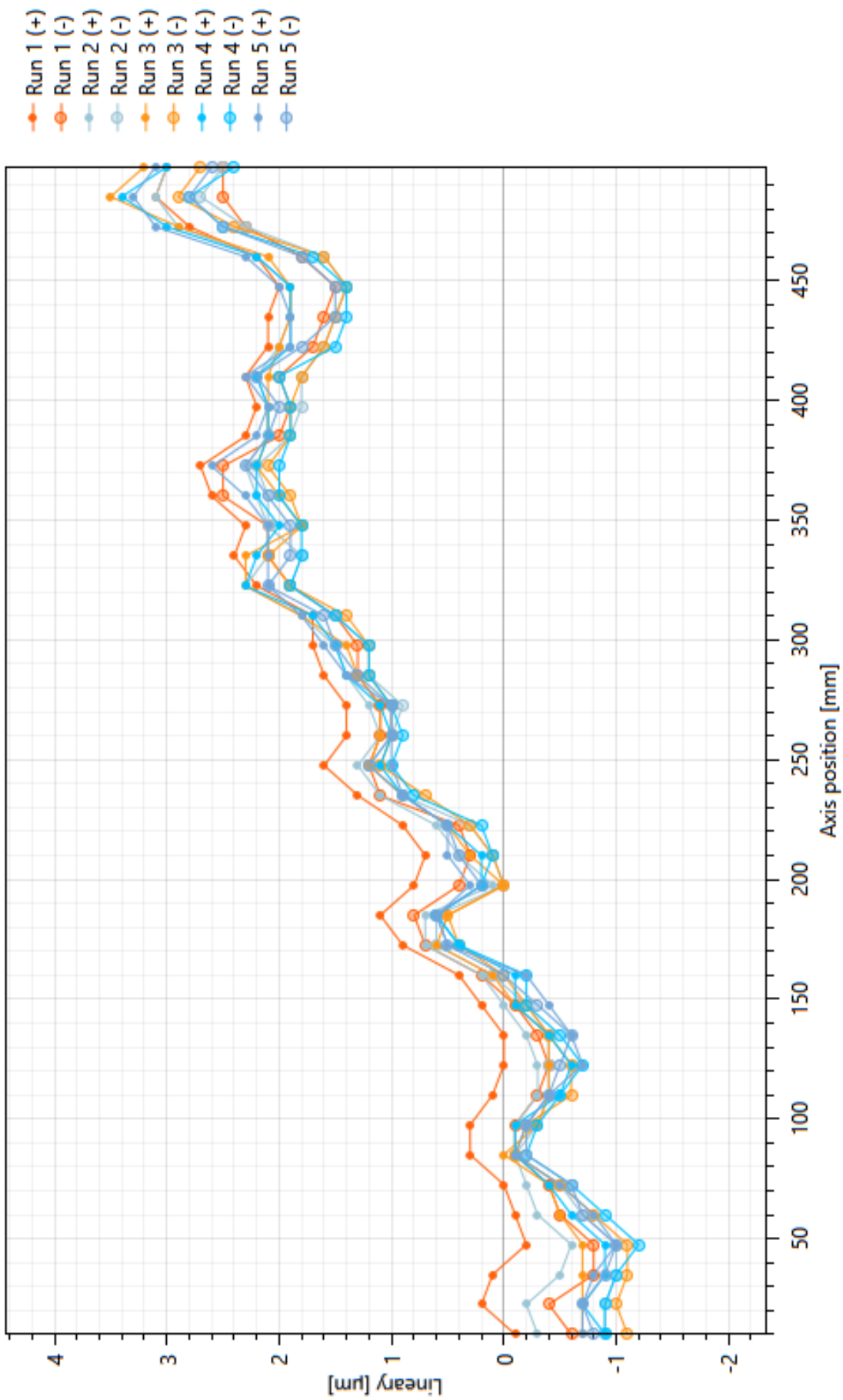
Měření Y2: Osa Y, 14 měřících bodů, 1000 mm/min, Datum 2.4.2014

Poloha [mm]	Odchylka [μm]									
	Run1(+)	Run1(-)	Run2(+)	Run2(-)	Run3(+)	Run3(-)	Run4(+)	Run4(-)	Run5(+)	Run5(-)
10	-0.1	-0.4	-0.1	-0.4	-0.3	-0.6	-0.4	-0.8	-0.6	-0.9
47	-0.5	-0.7	-0.4	-0.7	-0.5	-0.9	-0.6	-0.7	-0.6	-0.8
84	0.2	0.1	0.2	0	0.1	0	0.1	-0.4	-0.4	-0.4
121	-0.3	-0.2	-0.2	-0.6	-0.6	-0.8	-0.8	-0.8	-0.7	-0.9
158	-0.1	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	-0.6
195	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0	0	-0.1	-0.2	-0.1
232	0.9	0.7	0.8	0.7	0.8	0.5	0.6	0.4	0.6	0.5
269	0.7	0.5	0.8	0.7	0.8	0.7	0.7	0.6	0.5	0.2
306	1.3	1.1	1.3	1.1	1.2	0.9	1.1	0.8	1.1	0.7
343	1.6	1.6	1.4	1.3	1.4	1.3	1.2	1.2	1.4	1.3
380	1.6	1.4	1.7	1.4	1.6	1.4	1.5	1.4	1.5	1.3
417	1.7	1.2	1.6	1.2	1.5	1.1	1.4	1.1	1.5	1.1
454	1.3	1	1.5	1	1.5	1	1.4	0.9	1.3	0.9
491	2.5	2	2.5	2.1	2.7	2.2	2.6	2.3	2.3	1.9



Měření Y3: Osa Y, 40 měřících bodů, 1000 mm/min, Datum 2.4.2014

Poloha [mm]	Odchylka [μm]									
	Run1(+)	Run1(-)	Run2(+)	Run2(-)	Run3(+)	Run3(-)	Run4(+)	Run4(-)	Run5(+)	Run5(-)
10	-0.1	-0.6	-0.3	-0.9	-0.7	-1.1	-0.9	-0.9	-0.7	-0.8
22.5	0.2	-0.4	-0.2	-0.9	-0.7	-1	-0.7	-0.9	-0.7	-0.7
35	0.1	-0.8	-0.5	-1	-0.7	-1.1	-0.9	-1	-0.8	-0.9
47.5	-0.2	-0.8	-0.6	-1	-0.7	-1.1	-0.9	-1.2	-1	-1
60	-0.1	-0.5	-0.3	-0.7	-0.5	-0.8	-0.6	-0.9	-0.8	-0.7
72.5	0	-0.4	-0.2	-0.5	-0.4	-0.5	-0.4	-0.6	-0.5	-0.6
85	0.3	-0.1	-0.1	-0.1	0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.2
97.5	0.3	-0.1	-0.1	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	-0.3	-0.2	-0.2
110	0.1	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4
122.5	0	-0.4	-0.3	-0.4	-0.4	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.5
135	0	-0.3	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	-0.6	-0.6
147.5	0.2	-0.1	0	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1	-0.2	-0.4	-0.3
160	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	0	-0.1	-0.2	-0.2	0
172.5	0.9	0.7	0.7	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5
185	1.1	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6
197.5	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0.2	0.2	0.3	0.2
210	0.7	0.3	0.4	0.1	0.3	0.1	0.2	0.1	0.5	0.4
222.5	0.9	0.4	0.6	0.3	0.5	0.3	0.5	0.2	0.5	0.5
235	1.3	1.1	1.1	0.9	0.9	0.7	0.9	0.8	0.9	0.9
247.5	1.6	1.2	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1	1	1.2
260	1.4	1.1	1.1	1	1.1	1	1	0.9	1	1
272.5	1.4	1.1	1.2	0.9	1.1	1	1.1	1	1	1
285	1.6	1.3	1.4	1.2	1.3	1.2	1.4	1.2	1.4	1.3
297.5	1.7	1.3	1.5	1.2	1.4	1.2	1.5	1.2	1.6	1.5
310	1.7	1.5	1.8	1.5	1.8	1.4	1.7	1.5	1.8	1.6
322.5	2.2	1.9	2.3	1.9	2.3	1.9	2.3	1.9	2.1	2.1
335	2.4	2.1	2.1	1.8	2.3	2.1	2.2	1.8	2.1	1.9
347.5	2.3	2.1	2.1	2.1	1.8	1.8	2	1.8	2.1	1.9
360	2.6	2.5	2.2	2.1	2	1.9	2.2	2	2.3	2.1
372.5	2.7	2.5	2.3	2.2	2.2	2.1	2.2	2	2.6	2.3
385	2.3	2	2.1	1.9	2.1	1.9	2.1	1.9	2.2	2.1
397.5	2.2	1.9	2.1	1.8	2.1	1.9	2.1	1.9	2.1	2
410	2.3	2	2.2	1.8	2.1	1.8	2.2	2	2.3	2.2
422.5	2.1	1.7	2	1.6	2	1.6	1.9	1.5	1.9	1.8
435	2.1	1.6	1.9	1.5	1.9	1.5	1.9	1.4	1.9	1.5
447.5	2	1.5	1.9	1.4	1.9	1.4	1.9	1.4	2	1.5
460	2.2	1.8	2.2	1.6	2.1	1.6	2.2	1.7	2.3	1.8
472.5	2.8	2.3	2.9	2.3	2.9	2.4	3	2.5	3.1	2.5
485	3.1	2.5	3.1	2.7	3.5	2.9	3.4	2.8	3.3	2.8
497.5	3	2.5	3	2.5	3.2	2.7	3	2.4	3.1	2.6



Měření Z1: Osa Z, 14 měřících bodů, 1000 mm/min, Datum 2.4.2014

Poloha [mm]	Odchylka [μm]									
	Run1(+)	Run1(-)	Run2(+)	Run2(-)	Run3(+)	Run3(-)	Run4(+)	Run4(-)	Run5(+)	Run5(-)
-455	0.1	0.9	0.1	0.9	0.1	1	0.2	1.1	0.3	1.1
-420	0.8	1.6	0.8	1.6	0.8	1.6	1	1.7	1	1.8
-385	1.6	2.3	1.6	2.3	1.7	2.4	1.8	2.4	1.8	2.5
-350	3.3	4.1	3.4	4.2	3.5	4.3	3.5	4.3	3.6	4.3
-315	6.4	7.3	6.4	7.4	6.6	7.5	6.6	7.5	6.7	7.5
-280	10	10.8	10	10.8	10.2	11	10.2	10.9	10.2	11
-245	13.5	14.1	13.5	14.1	13.8	14.2	13.7	14.3	13.8	14.3
-210	17.5	18.1	17.6	18.1	17.7	18.1	17.8	18.3	17.8	18.3
-175	21.4	21.9	21.5	21.9	21.6	21.9	21.6	22	21.7	22.1
-140	23.8	24.2	23.9	24.2	24	24.1	24	24.4	24.1	24.4
-105	25.2	25.5	25.3	25.5	25.3	25.5	25.3	25.7	25.4	25.7
-70	26.3	26.7	26.3	26.7	26.3	26.7	26.3	26.9	26.4	26.8
-35	26.3	27	26.4	27	26.5	27.1	26.5	27.3	26.6	27.3
0	21.6	22.3	21.5	22.3	21.6	22.4	21.7	22.5	21.8	22.5

Měření Z2: Osa Z, 40 měřících bodů, 1000 mm/min, Datum 2.4.2014

Poloha [mm]	Odchylka [μm]									
	Run1(+)	Run1(-)	Run2(+)	Run2(-)	Run3(+)	Run3(-)	Run4(+)	Run4(-)	Run5(+)	Run5(-)
-448.5	-0.2	0.4	-0.4	0.3	-0.5	0.3	-0.4	0.2	-0.6	0.2
-437	-0.1	0.5	-0.2	0.4	-0.3	0.4	-0.3	0.3	-0.4	0.2
-425.5	0.3	0.8	0.1	0.7	0	0.6	-0.1	0.5	-0.2	0.5
-414	0.6	1.1	0.3	0.9	0.2	0.9	0.2	0.8	0.1	0.9
-402.5	0.8	1.3	0.6	1.2	0.5	1.2	0.5	1.1	0.4	1.1
-391	0.8	1.2	0.6	1.2	0.6	1	0.4	1	0.3	1
-379.5	1.5	2	1.3	1.8	1.2	1.8	1.1	1.7	1	1.7
-368	2.2	2.7	2	2.6	2	2.6	1.9	2.4	1.9	2.5
-356.5	2.6	3	2.4	2.9	2.4	2.9	2.2	2.7	2.2	2.8
-345	3.3	3.8	3.2	3.7	3.1	3.6	3	3.5	2.9	3.5
-333.5	4.5	5	4.3	4.9	4.2	4.8	4.1	4.7	4	4.8
-322	5.5	6.1	5.4	6	5.3	6	5.2	5.8	5.1	5.9
-310.5	6.6	7.2	6.4	7.1	6.3	6.9	6.3	6.9	6.2	6.9
-299	7.7	8.3	7.5	8.3	7.4	8.1	7.4	8	7.3	8.1
-287.5	9.1	9.7	9	9.6	8.9	9.5	8.9	9.4	8.8	9.4
-276	10.2	10.6	10	10.6	10	10.4	9.9	10.5	9.8	10.3
-264.5	11.3	11.6	11.2	11.6	11	11.5	11	11.4	10.9	11.4
-253	12.5	12.9	12.4	12.7	12.4	12.7	12.3	12.6	12.2	12.6
-241.5	13.7	13.8	13.5	13.8	13.3	13.6	13.3	13.6	13.2	13.5
-230	14.8	15	14.6	14.9	14.5	14.8	14.4	14.7	14.4	14.7
-218.5	16.2	16.4	16	16.3	15.9	16.2	15.9	16.2	15.8	16.1
-207	17.7	17.9	17.5	17.9	17.4	17.7	17.3	17.6	17.3	17.6
-195.5	19.2	19.5	19.1	19.3	18.9	19.2	18.8	19.1	18.8	19.1
-184	20.2	20.3	20.1	20.2	19.8	20.1	19.8	20.1	19.8	19.9
-172.5	21.3	21.4	21.1	21.3	21	21.2	21	21.1	20.8	21
-161	22.3	22.4	22.2	22.2	22	22.1	22	22	21.8	22
-149.5	23	22.9	22.8	22.8	22.7	22.8	22.6	22.7	22.6	22.5
-138	23.5	23.5	23.4	23.4	23.2	23.4	23.2	23.2	23.1	23.1
-126.5	23.9	24	23.8	23.9	23.6	23.8	23.6	23.7	23.4	23.6
-115	24.3	24.3	24	24.2	23.9	24.1	23.8	24	23.9	23.8
-103.5	24.7	24.9	24.6	24.8	24.4	24.7	24.4	24.5	24.3	24.4
-92	25.3	25.5	25.1	25.3	24.9	25.2	24.8	25.1	24.8	25
-80.5	25.6	25.9	25.4	25.6	25.3	25.6	25.1	25.5	25.3	25.4
-69	25.7	26.1	25.6	25.8	25.5	25.8	25.3	25.7	25.3	25.6
-57.5	25.8	26.2	25.7	26.1	25.5	25.9	25.4	25.8	25.4	25.8
-46	26	26.5	25.8	26.3	25.7	26.2	25.6	26.1	25.6	26
-34.5	25.9	26.5	25.7	26.3	25.6	26.3	25.6	26.1	25.5	25.9
-23	25.7	26.3	25.5	26.2	25.4	26.1	25.3	25.9	25.4	25.9
-11.5	23.9	24.6	23.7	24.4	23.7	24.4	23.5	24.2	23.6	24.1
0	21.2	21.9	20.9	21.5	20.7	21.6	20.7	21.4	20.7	21.4

