

Polohování CNC frézky dle normy ISO 230-2

Bc. Libor Bravenec

Diplomová práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Libor BRAVENEK**

Osobní číslo: **T10546**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Řízení jakosti**

Téma práce: **Polohování CNC frézky dle normy ISO 230-2.**

Zásady pro vypracování:

Teoretická část

- 1) Popište normy zabývající se přesností polohování CNC strojů**
- 2) Popište možnosti využití laserinterferometru Renishaw pro stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách**
- 3) Stanovte vhodný statisticko matematický postup pro vlastní vyhodnocení přesnosti polohování**

Praktická část

- 1) Ustavte laserinterferometr do měřicí polohy a určete odpovídající způsob upnutí jednotlivých měřících elementů**
- 2) Sestavte vhodný program pro CNC frézku pro proměření přesnosti jejího polohování**
- 3) Naměřené hodnoty matematicky vyhodnoťte a porovnejte normy řady ISO a VDI/DGQ**
- 4) Dle naměřených hodnot vyvodte závěry a praktické aplikace**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Vladimír Pata
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

13. února 2012

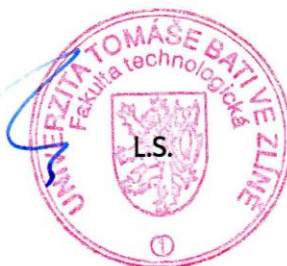
Termín odevzdání diplomové práce:

18. května 2012

Ve Zlíně dne 2. února 2012



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan





prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: BRAVENEC LIBOR Obor: ŘÍZENÍ JAKOSTI

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 10.5.2012

Bravenec Libor

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydávalečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užit či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je měření polohování frézky HWT C-442 CNC podle normy ISO 230-2. Teoretická část je věnována posuzování přesnosti obráběcích strojů a normám zabývajících se měřením přesnosti CNC strojů. V této části jsou popsány základní principy měření polohování obráběcích strojů pomocí laserinterferometru.

Praktická část se zabývá vlastním měřením polohování laserinterferometrem Renishaw XL80 a vyhodnocením naměřených dat. Je posouzen stav polohovacích mechanismů stroje a navrženy praktické aplikace pro zlepšení polohování.

Klíčová slova: přesnost polohování, rozlišení, opakovatelnost, CNC obráběcí stroj, laserinterferometr, rotační snímač, lineární snímač.

ABSTRACT

The aim of the thesis is positioning measurement of milling machine HWT C-442 CNC according to ISO 230-2 standard. The theoretical part is devoted to assessing the accuracy of machine tools and standards for accuracy measurement of CNC machines. This section describes the basic principles of positioning measurement of machine tools using a laserinterferometer.

The practical part deals with positioning measurement with laserinterferometer Renishaw XL80 and evaluation of the measured data. The state of the machine positioning mechanisms is considered and practical applications to improve the positioning are designed.

Keywords: positioning accuracy, resolution, repeatability, CNC machine tool, laserinterferometer, rotary encoder, linear encoder.

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi, za odborné vedení a ochotu, kterou mi věnoval při vypracování této diplomové práce. Při vlastním měření polohování frézky mi také velmi pomohli Ing. Jakub Černý a Ing. Martin Řezníček. Rád bych poděkoval pracovníkům kontroly kvality TOSHULIN, a.s., panu Milanu Škařupovi a Václavu Kuželovi, za cenné rady z oblasti měření polohování strojů. Poděkování patří i výrobcí měřené frézky, Ing. Zbyňku Kaislerovi a autorovi řídicího systému frézky Ing. Petru Nevařilovi, za podrobné informace o stroji.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POSUZOVÁNÍ PŘESNOSTI OBRÁBĚCÍCH STROJŮ	12
1.1 STANDARDNÍ ZKOUŠKY OBRÁBĚCÍCH STROJŮ	13
1.1.1 Geometrická přesnost strojů.....	15
1.1.2 Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách	16
1.1.3 Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn.....	18
1.2 DEFINICE PŘESNOSTI POLOHOVÁNÍ OBRÁBĚCÍCH STROJŮ	18
1.2.1 Přesnost (nejistota) nastavení polohy.....	19
1.2.2 Rozlišitelnost nastavení polohy.....	21
1.2.3 Opakovatelnost nastavení polohy	21
1.3 TEPLOTNÍ RUŠIVÉ VLIVY OBRÁBĚCÍCH STROJŮ	22
1.3.1 Teplotní stabilita obráběcích strojů.....	23
1.3.2 Podchycení polohy v pohonech posuvů	23
2 NORMY ZABÝVAJÍCÍ SE MĚŘENÍM PŘESNOSTI CNC STROJŮ	25
2.1 VŠEOBECNÝ PŘEHLED NOREM ZABÝVAJÍCÍCH SE POLOHOVÁNÍM CNC STROJŮ	25
2.2 NORMY ČSN ISO 230 – ZÁSADY ZKOUŠEK OBRÁBĚCÍCH STROJŮ	25
2.2.1 ČSN ISO 230-1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění	25
2.2.2 ČSN ISO 230-2: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách.....	26
2.2.3 ČSN ISO 230-3: Určení tepelných vlivů	26
2.2.4 ČSN ISO 230-4: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených strojů.....	27
2.2.5 ČSN ISO 230-5: Určení emise hluku.....	27
2.2.6 ČSN ISO 230-6: Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn	28
2.3 STANOVENÍ PŘESNOSTI A OPAKOVATELNOSTI NASTAVENÍ POLOHY V ČÍSLICOVĚ ŘÍZENÝCH OSÁCH DLE NORMY ČSN ISO 230-2: 2006	28
2.3.1 Termíny a definice	28
2.3.2 Environment	35
2.3.3 Zkoušený stroj	36
2.3.4 Temperace stroje	36
3 MĚŘENÍ POLOHOVÁNÍ OBRÁBĚCÍCH STROJŮ POMOCÍ LASEROVÉHO INTERFEROMETRU	37
3.1 ZÁKLADNÍ PRINCIP INTERFEROMETRU	37
3.2 LASEROVÝ SYSTÉM RENISHAW XL-80.....	40
3.2.1 Lineární polohování a opakovatelnost	43
3.3 CHYBY VZNIKAJÍCÍ NEVHODNÝM SEŘÍZENÍM LASERINTERFEROMETRU	45
3.3.1 Chyba vznikající tzv. Mrtvou dráhou.....	45
3.3.2 Cosinova chyba	47
3.3.3 Abbeho chyba.....	48

3.4	VLIV PROSTŘEDÍ NA INTERFEROMETRICKÁ MĚŘENÍ.....	48
3.4.1	Chyby nejvíce ovlivňující přesnost laserového systému	50
II	PRAKTICKÁ ČÁST	51
4	POPIS MĚŘENÉ FRÉZKY HWT C-442 CNC	52
4.1	OBECNÝ POPIS	52
4.2	SPECIFIKACE FRÉZKY HWT C-442 CNC.....	53
4.2.1	Řídicí systém	54
5	MĚŘENÍ POLOHOVÁNÍ LASERINTERFEROMETREM	55
5.1	NASTAVENÍ LASERU PŘED VYROVNÁNÍM PAPERU	55
5.2	USTAVENÍ OPTICKÝCH PRVKŮ LASERINTERFEROMETRU	56
5.3	SNÍMÁNÍ DAT.....	62
6	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	70
6.1	VÝPOČET PARAMETRŮ POLOHOVÁNÍ DLE NORMY ČSN ISO 230-2:2006	70
6.1.1	Výpočet odhadů nejistot měření lineárního polohování	77
6.1.2	Výpočet odhadů nejistot parametrů lineárního polohování	79
6.2	VYHODNOCENÍ PARAMETRŮ POLOHOVÁNÍ DLE NORMY ČSN ISO 230-2:2006	85
6.3	VYHODNOCENÍ POLOHOVÁNÍ PODLE NORMY VDI/DGQ 3441	86
6.4	POROVNÁNÍ NOREM ČSN ISO 230-2:2006 A VDI/DGQ 3441	87
7	ZÁVĚRY A PRAKTICKÉ APLIKACE.....	89
7.1	VYHODNOCENÍ STAVU POLOHOVACÍCH MECHANISMŮ STROJE	89
7.2	NÁVRHY PRAKTICKÝCH APLIKACÍ PRO ZLEPŠENÍ POLOHOVÁNÍ.....	92
7.2.1	Aplikace rotačních snímačů pohonových servomotorů	93
7.2.2	Aplikace lineárního měření nastavení polohy	94
	ZÁVĚR	95
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	96
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	99
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	100
	SEZNAM POUŽITÉHO ANGLICKÉHO NÁZVOSLOVÍ	102
	SEZNAM OBRÁZKŮ	104
	SEZNAM TABULEK.....	107
	SEZNAM ROVNIC	108
	SEZNAM PŘÍLOH.....	110

ÚVOD

Kolísání rozměrů obrobků dává přímou informaci o výrobní přesnosti stroje. Nejistotou výroby rozumíme přesnost, s níž může být vyrobena jistá součást na zadaném stroji při definovaném provozním stavu. Nejistota výroby zahrnuje úchyly způsobené strojem a ostatními činiteli. Všechny úchyly od požadované přesnosti, které vznikají na vlastním stroji, se nazývají nejistota práce. Sem řadíme vše, co souvisí se systematickou a náhodnou úchylností - tedy i integrující veličinu nejistota polohy (přesnost polohování). [3]

U všech CNC obráběcích strojů, kde je nastavována poloha, je mírou pro polohovou přesnost nejistota polohy. Polohová nejistota udává, s jakou přesností lze dosáhnout libovolně zvolené polohy v rozsahu zdvihu jednotlivých os. [3]

Zkušební postupy pro určení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách specifikuje norma ČSN ISO 230-2. Zkoušky jsou určeny pro měření relativního posunutí mezi zařízením, které upíná nástroj a zařízením, které upíná obráběný díl. [5]

Pro zjištění chyb polohovacího systému stroje musíme být nejprve schopni změřit malé rozdíly mezi zamýšlenou a skutečnou polohou pohyblivé části v různých bodech podél osy. Toho lze dosáhnout přemístováním osy stroje do řady postupných poloh terče při použití laserinterferometru k měření přesnosti a opakovatelnosti těchto pohybů terče. [18]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POSUZOVÁNÍ PŘESNOSTI OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

Obráběcí stroj musí mít dostatečnou pracovní přesnost. Ta se testuje měřením geometrické přesnosti a několika dalšími zkouškami přesnosti nastavení polohy. Důležitá je také přesnost kruhové interpolace a přesnost chodu včetně za rotace. [1]

S geometrickou přesností stroje je úzce svázána přesnost polohování (*positioning accuracy*). V podstatě se jedná o zastavení suportu stroje co nejpřesněji na žádané pozici. Suport stroje se přitom při reálném obrábění nemusí pohybovat po přímce pouze v jedné ose, ale po křivce v prostoru za použití dvou nebo všech tří lineárních os. Tady je zřejmá souvislost mezi přesností geometrickou a přesností polohování. Aby byl při obrábění co nejpřesněji dodržen požadovaný tvar pohybu suportu (nástroje) kdekoli v pracovním prostoru stroje, je nutné nastavit co nejpřesněji geometrii stroje i zajistit správné polohování při pohybu v ose. [2]

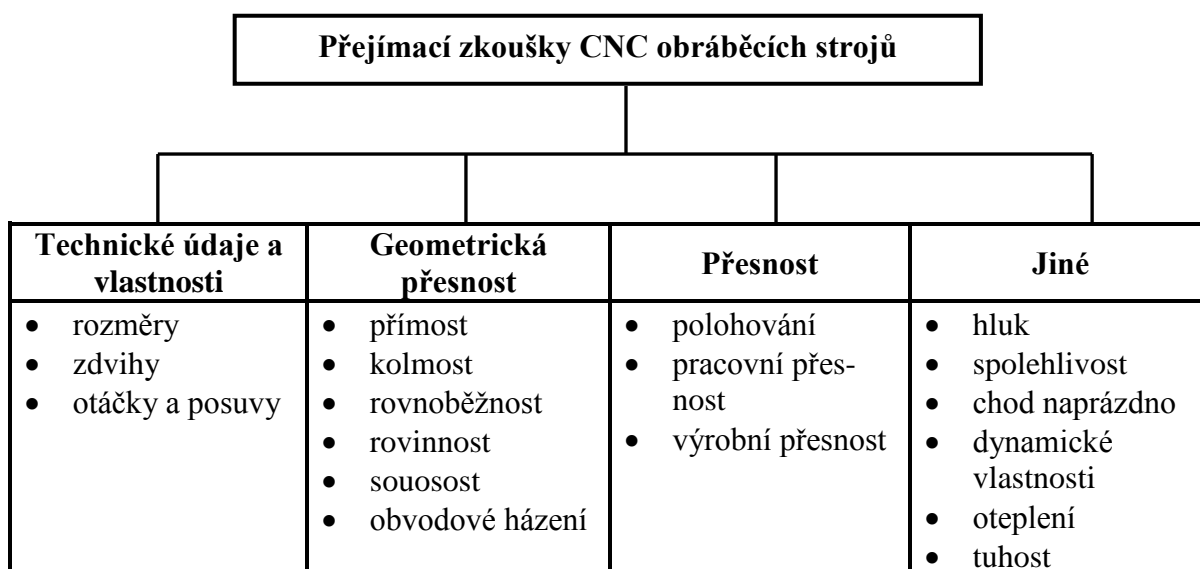
Samotnou přesnost polohování obráběcích strojů lze tedy definovat jako velikost odchylky skutečné polohy nástroje od hodnoty požadované. Je zřejmé, že požadavky na velikost odchylky (a tím přesnost) se budou lišit podle typu stroje a podle dané aplikace. Na dřevoobráběcím stroji asi nebudeme požadovat takovou přesnost jako u kovoobráběcích strojů, stejně tak jinou přesnost budeme očekávat od strojů pro laboratorní a testovací účely. Protože se požadavky na přesnost běžných současných obráběcích strojů pohybují v setinách nebo tisícinách milimetrů, je zřejmé, že má smysl se přesností strojů zabývat a je užitečné definovat postupy mechanické montáže i nastavení řídicího NC systému tak, aby byl nový (popř. generálováný) stroj uveden do provozu co nejdříve a s co nejlepšími parametry. [2]

Pracovní přesnost stroje je dále ovlivněna teplotní stálostí tvaru stroje a stálostí rozměrů jeho důležitých součástí. Malé teplotní deformace mezi nástrojem a obrobkem zaručují udržení přesnosti obrobků během výrobní směny. [1]

Každý stroj musí mít také dostatečnou výkonnost, čili musí obrobít jistý počet obrobků za směnu nebo odebrat určité množství materiálu obrobku za jednotku času. Výkonnost záleží nejen na použitých nástrojích a technologických podmínkách, ale také na dynamických vlastnostech stroje. Ty se testují zkouškou využití výkonu, jejíž výsledky závisí na stabilitě obrábění. Stabilitou obrábění se míní možnost odebrat co nejvyšší množství materiálu obrobku za jednotku času, aniž by vzniklo regenerativní chvění. Vysoká stabilita je podmíněna dostatečnou statickou tuhostí strojů. [1]

Nízká hlučnost v místě obsluhy stroje je důležitá z hygienického i bezpečnostního hlediska. Vyžaduje se kvůli pracovní pohodě obsluhy, která pak nechybuje. Hluk při obrábění vzniká řezáním obráběného materiálu, ale i vzájemným pohybem různých dílců stroje. Nízká hlučnost v místě obsluhy se dosahuje dobrým krytováním, přesnou výrobou a bezchybnou montáží dílů stroje. Tím se sníží i vibrace stroje, jejichž úroveň úzce souvisí s hlučností. [1]

Mezi důležité vlastnosti obráběcích strojů patří i ekonomické parametry jako např. nízké provozní náklady, malá zastavěná plocha a další. Ty se však ověřují jinými postupy. [1]



Obr. 1. Přejímací zkoušky CNC obráběcích strojů. [3]

1.1 Standardní zkoušky obráběcích strojů

Základní norma pro zkoušení obráběcích strojů je ČSN ISO 230. Obsahuje zásady zkoušek obráběcích strojů, tedy vlastně metody měření jednotlivých vlastností obráběcích strojů.

- ISO 230-1, Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění;
- ISO 230-2, Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách;

- ISO 230-3, Vyhodnocení tepelných vlivů;
- ISO 230-4, Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů;
- ISO 230-5, Měření emise hluku;
- ISO 230-6, Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn (Zkouška diagonálního přestavení);
- ISO 230-7:2006, Geometrická přesnost rotačních os (přesnost vřeten, otočných a naklápěcích hlav a stolů);
- ISO/TR 230-8, Stanovení úrovní vibrací.

Z těchto metod si konstruktér spolu se zkušebním technikem vybírají potřebné zkoušky prototypu i sériového stroje. Stroje vyráběné podle dokumentace odzkoušeného prototypu se ovšem zkouší omezeně. Rozsah jejich zkoušek záleží často na úmluvě mezi výrobcem a zákazníkem, pro kterého je stroj určen a je obvykle zakotven ve smlouvě. Často se měří jen geometrická přesnost a hlučnost a doplňují se, např. u strojů pro velkosériovou výrobu, zkouškami spolehlivosti a stability pracovní přesnosti, což je pro přejímací testy stroje dostatečné. Standardizované metody se používají proto, aby se zaručila jednotná metodika měření a tím i srovnatelné výsledky. [1]

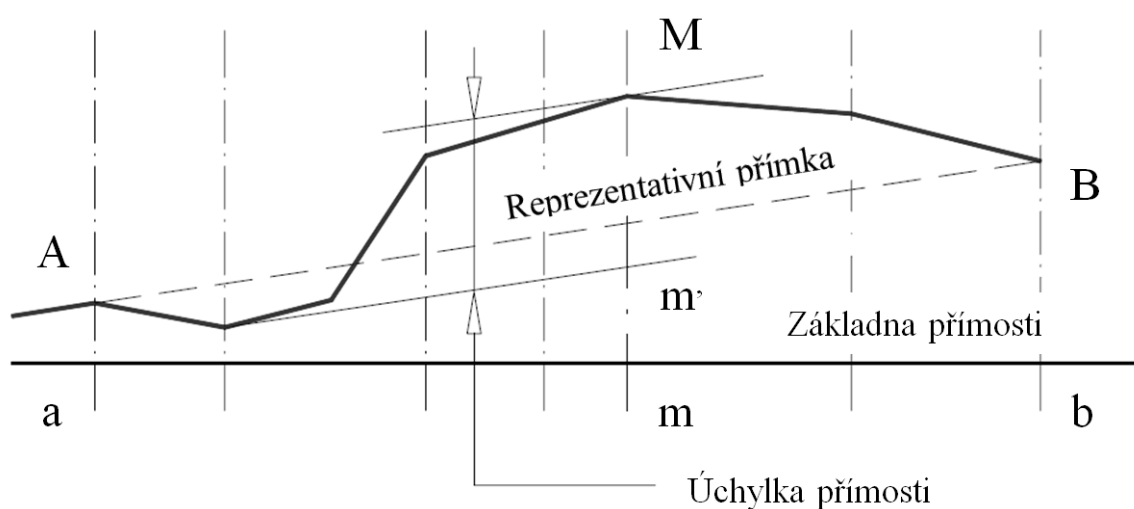
ČSN ISO 230 navíc připouští využití i jiných metod, které v ní nejsou obsaženy, pokud přinášejí srovnatelné nebo lepší získané informace o stroji. Norma tedy není pro výrobce svazující. Světově významní (velcí) výrobci strojů si stanovují své standardy, které jsou mnohdy přísnější než standardy normalizované. [3]

Standardní zkoušky přesnosti obráběcích strojů tvoří soubor, který poskytuje ucelené informace o stroji. Výsledky odráží jak vliv přesnosti výroby dílců stroje a jejich montáže, tak určitý vliv seřízení pohonů na přesnost obrobku a také vliv tepla vznikajícího při činnosti stroje i tepla působícího v okolí stroje. Spolu s doporučenými tolerancemi přesnosti, případně s výsledky zkoušky pracovní přesnosti při obrábění zkušebního obrobku, se údaje o přesnosti nejčastěji používají k účelům přejímky strojů. Slouží i k pozdější kontrole stavu strojů, kde se obvykle doplňují diagnostickým měřením vynucených vibrací. [1]

1.1.1 Geometrická přesnost strojů

Prof. Georg Schlesinger, německý technik, zavedl systematické posuzování přesnosti obráběcích strojů za účelem jejich přejímky zákazníkem. Prvně byla jeho metoda uplatněna na dodávkách německých strojů do Ruska ve 30 letech 20. stol. Stal se ředitelem pro výzkum Institutu výrobních inženýrů a navrhl, vyrobil a publikoval soubor nástrojů, měřicích přístrojů a přípravků k měření geometrické přesnosti obráběcích strojů. Vytvořil standardní, jednoduché postupy testů přesnosti včetně dovolených tolerancí odchylek. Zavedl praxi, kdy musela být zkontrolována geometrická přesnost každého vyrobeného stroje. Dodnes jsou jeho metody používány a v normě ISO 230-1 jsou doplněny dalšími, novějšími metodami a přístroji. [1]

Z dnešního pohledu byl vynález číslicového řízení pro obráběcí stroje v padesátých letech minulého století velkým impulsem, který nasměroval strojní obrábění k vysokým přesnostem řádu tisícín milimetru. Dnešní pomůcky a přístroje pro kontrolu geometrické přesnosti musí tedy být také velmi přesné. Geometrická přesnost se kontroluje měřením přímosti vodících ploch, rovinnosti stolů nebo vedení, kolmosti či pravoúhlosti vedení a ploch a jejich rovnoběžnosti a dalšími speciálními měřeními. Měří se také přímosti, kolmosti a rovnoběžnosti pohybů přestavitelných částí strojů. Např. přímost vedení stroje je definována jako svislá vzdálenost dvou přímek rovnoběžných s přímkou reprezentativní, měřená svisle. Reprezentativní přímka se určí jako spojnice dvou krajních bodů změřených dat. [1]

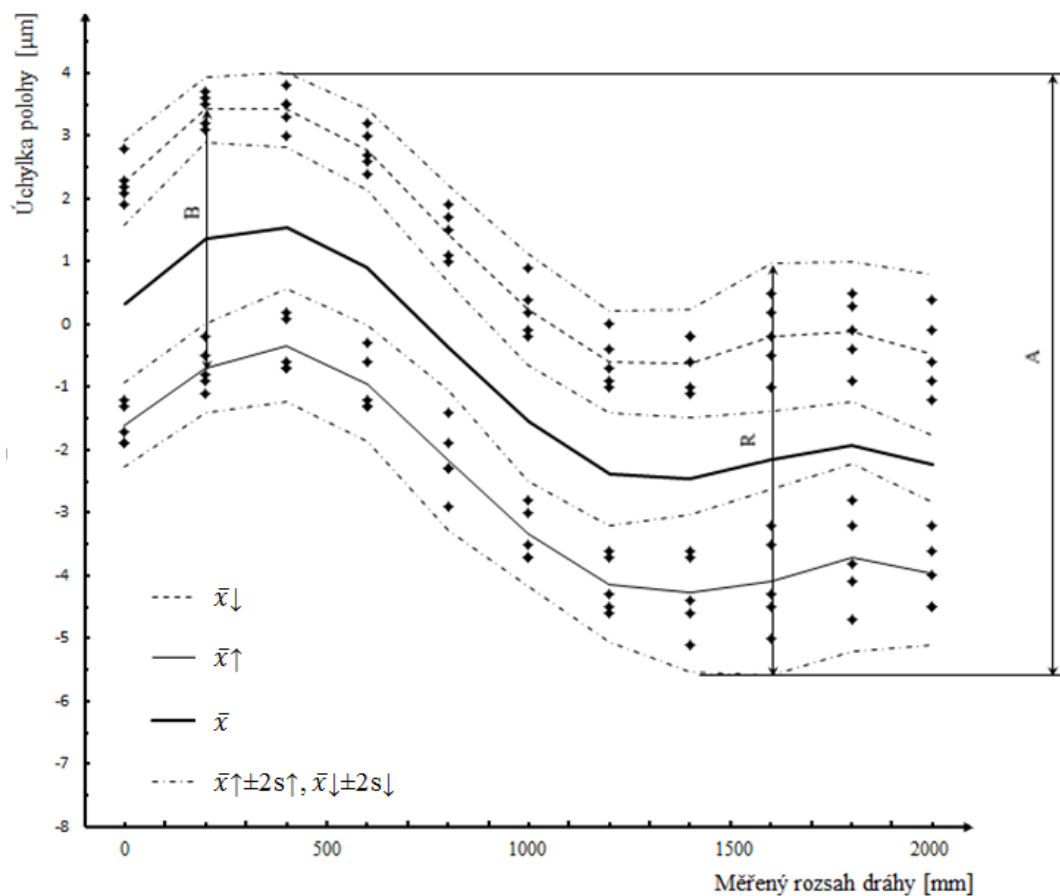


Obr. 2. Definice přímosti. [4]

1.1.2 Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách

Zatímco zkoušky geometrické přesnosti čerpající z metod prof. Schlesingera se používají pro klasické i číslicově řízené obráběcí stroje, tak zkouška opakovatelnosti nastavení polohy, rozumí se vlastně nastavení polohy nástroje vůči obrobku, je určena jen pro NC stroje. Zásady, definice výpočetních vztahů, zkušební podmínky, postupy měření i vyhodnocení a vyjádření výsledků najdeme v normě ČSN ISO 230-2. Zde nám jde o vysvětlení typických výsledků, jak je někdy nalezneme v běžné firemní literatuře ke strojům, případně v přejímacím protokolu stroje. Zkouška se provádí pro lineární i rotační osy. Úzce souvisí se zkouškami tepelných vlivů, neboť tepelné deformace často silně ovlivňují dosažitelnou přesnost obrábění. [1]

Standardních parametrů, které lze změřit a vypočítat, je devět. Nejčastěji se však udávají jen tři z nich. Jsou to dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose s označením A, dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v ose R a necitlivost v ose B. [1]



Obr. 3. Definice parametrů udávaných u zkoušek polohování. [5]

Data se dnes obvykle měří jednopaprskovým laserinterferometrem a odražečem. Zkouška probíhá tak, že se odražeč interferometru polohuje, např. spolu se stolem frézky, v jedné NC ose. To znamená, přesouvá se postupně do zvolených poloh. V každé poloze se změří odchylka docílené polohy stolu od naprogramované, ideální polohy. A to velmi přesně na zlomky mikrometru, ale prakticky se použijí obvykle jen desetiny mikrometru. Měří se takto v obou směrech pohybu, proto „oboustranná“ odchylka. Měření se opakuje obvykle pětkrát, aby bylo možné vypočítat statistické hodnoty získaných dat. Důležitý je dohodnutý zahřívací cyklus stroje a udržování tepelného pole stroje v dohodnutých tolerancích během zkoušky. [1]

Důležité pro uživatele stroje je porozumět významu udávaných parametrů, případně se orientovat i v grafu. Průměrné odchylky z obou směrů pohybu se v každé poloze vynesou na svislici grafu, čím vznikne střední, plná čára s rozsahem M (průměrná dvoustranná polohová odchylka). Kladné hodnoty značí, že nástroj (saně) přešel naprogramovanou polohu. Záporné značí nedojetí nástroje do správné polohy. M udává vlastně největší rozdíl mezi údaji naměřenými podél celé NC osy. [1]

Podobně se vynesou odchylky ve směru pohybu vpřed (forward) a zpět (backward). Rozdíl mezi takto vzniklými křivkami se označuje jako necitlivost osy, tedy nemožnost saně nebo nástroj v tomto pásmu ovládat, protože systém vlastně nereaguje na změnu směru pohybu. Ke křivkám jednostranných odchylek se ještě připočítávají hodnoty $+2s$ a $-2s$, tedy dvojnásobky standardní nejistoty nastavení dané polohy saní. To je možné chápat jako určitou pojistku nebo neurčitost, se kterou uživatel musí počítat ve svém odhadu přesnosti nastavení polohy saní. Celé křivky se obvykle neudávají a jsou reprezentovány pouze jednou hodnotou. Např. hodnotou A, již zmíněnou dvoustrannou přesností nastavení polohy nástroje nebo saní. [1]

Výrobci strojů používají naměřené křivky ke kompenzaci odchylek. Do kompenzačních tabulek v NC systému se zadají opačné hodnoty a servomechanismus saní již odchylky vyrovná. [1]

1.1.3 Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn

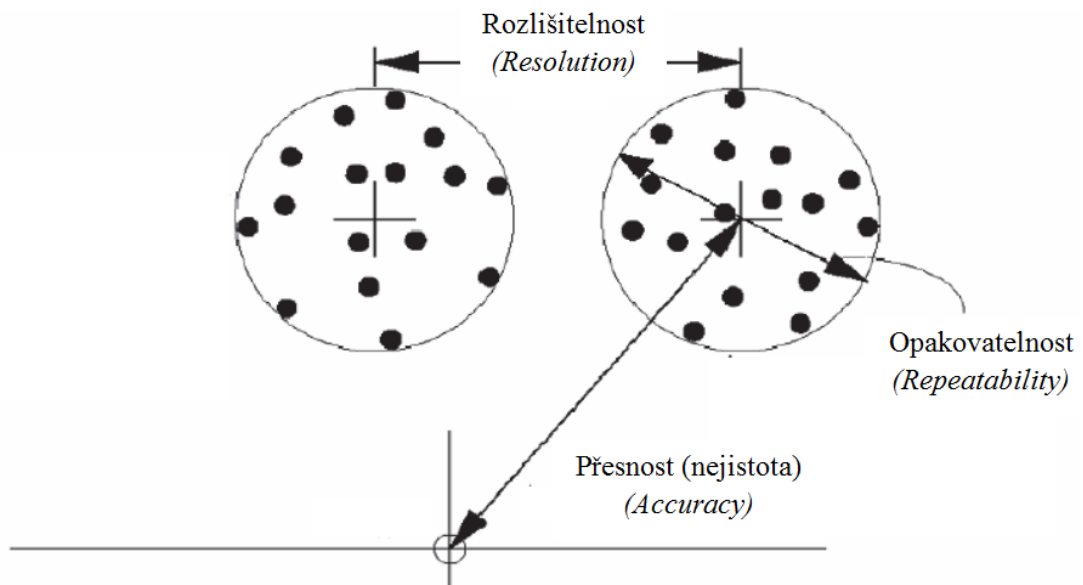
Zkouška diagonálního přestavení byla zavedena nedávno. Norma ČSN ISO 230-6 je z roku 2003. Je to obdoba zkoušky přesnosti nastavení polohy v ose, avšak odchylky nastavení polohy se měří diagonálně. Cílem je stanovit tzv. volumetrickou přesnost stroje. Čili přesnost polohování v celém pracovním prostoru. Přesnost nastavení polohy v jednotlivých NC osách totiž ukazuje pouze vlastnosti stroje v těsné blízkosti těchto os a neříká nic o přesnosti obrábění ve vzdálených pozicích nástrojů. Zkouška přesnosti diagonálního přestavení trvá sice poměrně dlouho, ale zato poskytuje informace, které nelze jinak získat. [1]

Postup měření i přístroje a vyhodnocení výsledků jsou obdobné jako při zkoušce polohování v osách, takže zde platí doporučení norem ISO 230-1 a 230-2. Nově je zde používán termín „pracovní objem“ jako objem myšleného hranolu, jehož hrany jsou určeny délkami drah v lineárních osách stroje pro pracovní operace. Diagonála tělesa je pak prostorová diagonála tohoto hranolu a diagonála stěny je jeho stěnová diagonála. Zrcadlo, upnuté ve vřetenu a simulující nástroj, se polohuje v diagonále pětkrát opakovaně v obou směrech a postupně se toto měření opakuje ve všech čtyřech prostorových diagonálách. Zkouška se může doplnit proměřením stěnových diagonál, takže výsledek se dá použít ke kontrole kolmosti os. Výsledné odchylky polohy se vynáší do obdobného grafu jako u zkoušky v NC osách. Udávají se E1, E2, E3, E4 – polohové odchylky změřené na čtyřech diagonálách pracovního prostoru stroje, z nich se vyhodnotí (souhrnná) diagonální polohová odchylka jako $E_d = \max(E_1, E_2, E_3, E_4)$ a dále se vyhodnotí diagonální necitlivost jako $B_d = \max(B_1, B_2, B_3, B_4)$. [1]

1.2 Definice přesnosti polohování obráběcích strojů

V současnosti jsou lineární polohovací systémy jednotlivých os charakterizovány třemi parametry:

- Přesnost (nejistota) stavění polohy (*accuracy*);
- Rozlišení stavění polohy (*resolution*);
- Opakovatelnost stavění polohy (*repeatability*). [6]



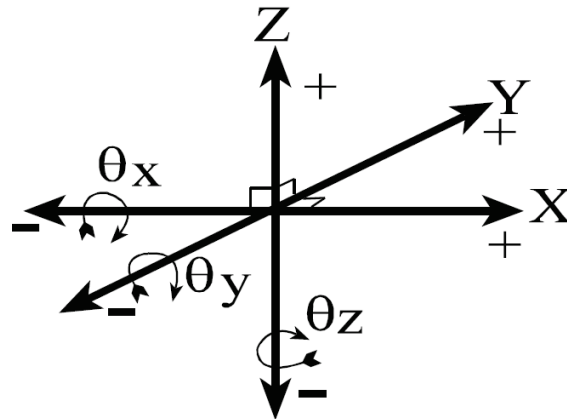
Obr. 4. Základní parametry stavění polohy v ose. [7]

1.2.1 Přesnost (nejistota) nastavení polohy

Je to těsnost shody mezi požadovanou a nastavenou polohou. Faktory ovlivňující přesnost zahrnují:

- Přesnost vedení, způsob konstrukce stroje. Je určena přesností vedení suportů, přesností ložisek, montáží, atd.;
- Přesností při polohování. Je ovlivněna faktory způsobující inkrementální pohyby, jako je odchylka kuličkového šroubu, chyby snímačů nastavení polohy, interakce mezi kuličkovým šroubem a maticí, ložisky, atd. [6]

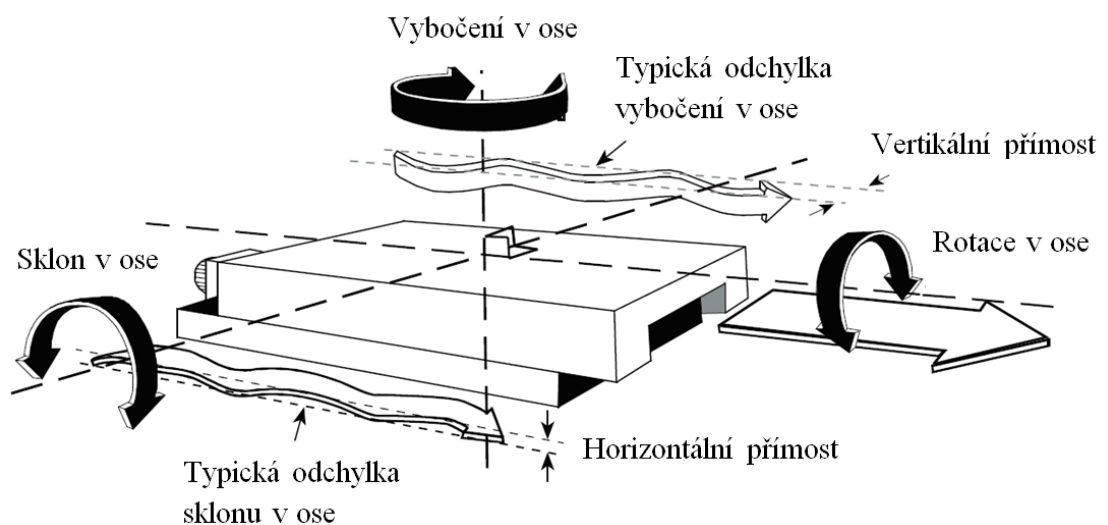
Vodící plochy samotné můžou obsahovat odchylky ve všech šesti stupních volnosti.



Obr. 5. Šest stupňů volnosti v prostoru. [6]

Každý lineární pohyb v obráběcím stroji obsahuje sedm možných parametrických chyb.

- Nastavení polohy v ose (*Axial linear positioning*);
- Osová přímost v horizontálním směru (*Axial straightness horizontal direction*);
- Osová přímost ve vertikálním směru (*Axial straightness vertical direction*);
- Chyba rotace v ose (*Roll error*);
- Chyba sklonu v ose (*Pitch error*);
- Chyba vybočení v ose (*Yaw error*);
- Osová kolmost (*Axial squareness*). [8]



Obr. 6. Znáznornění chyb vodících ploch. [6]

1.2.2 Rozlišitelnost nastavení polohy

Rozlišitelnost (*Resolution*) je definována jako nejmenší změna polohy, která může být realizována. To jest vykonána polohovacím systémem a odměřena snímači nastavení polohy.

Rozlišitelnost je limitována:

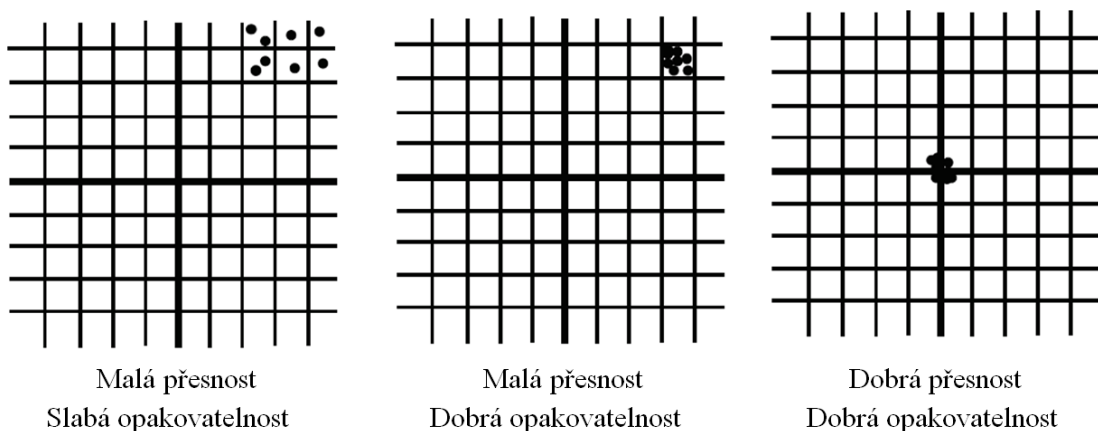
- Kvalitou snímačů polohy;
- Kvalitou řídicího systému;
- Třením (efekt odlepení a skluzu);
- Vůlí v polohovacím systému (*Backlash*). [6][7]

1.2.3 Opakovatelnost nastavení polohy

Opakovatelnost (*Repeatability*) je definována jako míra schopnosti systému důsledně se vracet do stejné pozice. Nezávisí na přesnosti požadované pozice, pouze na schopnosti systému vracet se do stejné pozice zas a zase. Opakovatelnost může být specifikována jako jednosměrná nebo obousměrná. Dobrá opakovatelnost má za následek nízký rozptyl datových bodů.

Faktory ovlivňující opakovatelnost jsou zejména:

- Změna teploty;
- Tepelná roztažnost materiálů;
- Opotřebení;
- Vůle v polohovacím systému. [6]

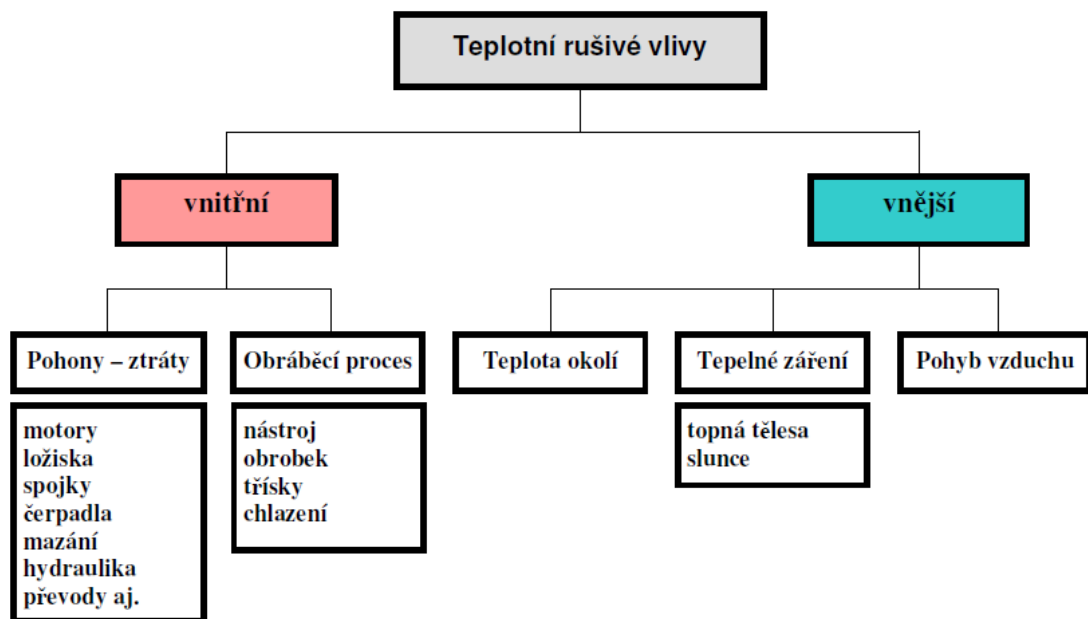


Obr. 7. Znáznornění přesnosti versus opakovatelnost. [6]

1.3 Teplotní rušivé vlivy obráběcích strojů

Obráběcí stroje jsou v provozu vystaveny působení řady zdrojů tepla, které v závislosti na zatížení (výkon, otáčky) a čase ovlivňují změny teploty jednotlivých uzlů stroje. Tyto jsou potom příčinou nežádoucích deformací, které mají nepříznivý vliv na přesnost a výrobnost obráběcích strojů. [9]

Rušivé vlivy ovlivňující tepelnou stabilitu obráběcích strojů lze členit do dvou hlavních skupin. Vnější rušivé vlivy jsou zdroje tepla v okolí (topná tělesa, stěny haly, jiné stroje aj.), sluneční záření a teplota okolního prostředí (např. vzduchu, chladicí kapaliny, mazací prostředky atd.). Přenos tepla na obráběcí stroj je u této skupiny převážně zářením (radiací) a prouděním (konvekcí). Vnitřní rušivé vlivy jsou ztráty pohonových motorů všech druhů, obráběcí proces a tření v převodech, uloženíh a vedeních. U této skupiny rušivých vlivů se přestup tepla děje převážně vedením (kondukcí). [9]



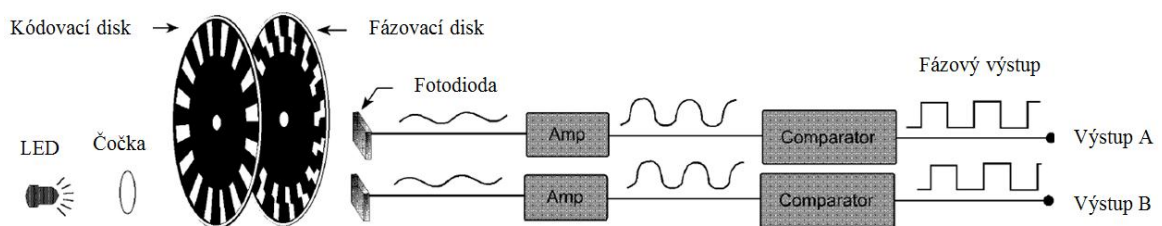
Obr. 8. Teplotní rušivé vlivy. [9]

1.3.1 Teplotní stabilita obráběcích strojů

Pro zabránění vzniku teplotních odchylek jsou využívána různá konstrukční řešení jako aktivní chlazení, symetrická výstavba stroje a měření teplot. Podstatným zdrojem nárůstu délky vlivem oteplení v lineárních osách je kuličkový šroub. V závislosti na rychlosti posuvu a řezných silách se mohou tyto přírůstky délky rychle měnit. Změna délky na obráběcím stroji (typicky $100 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ v průběhu 20 min) může vést k markantním chybám rozměru obrobku. [10]

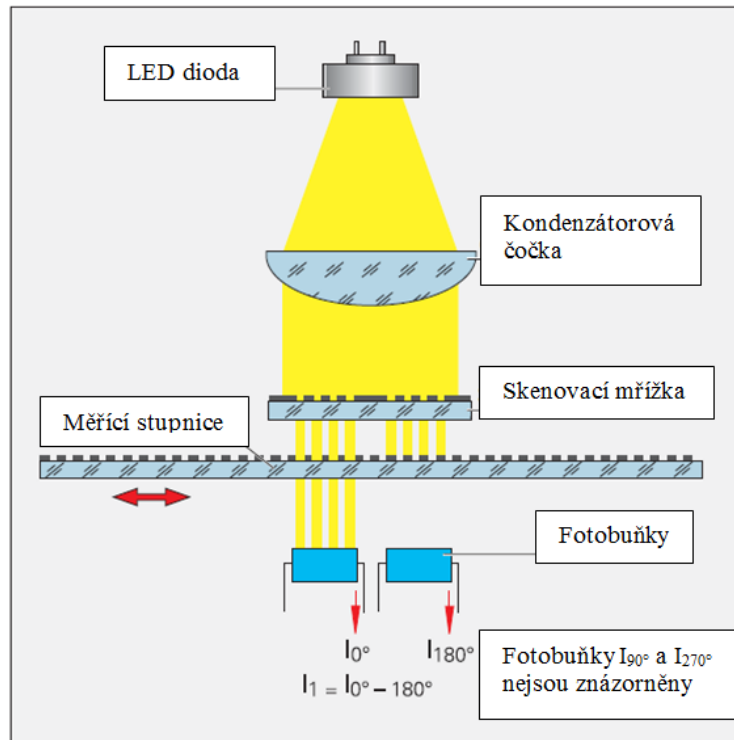
1.3.2 Podchycení polohy v pohonech posuvů

Údaj polohy NC osy je možné snímat z úhlové polohy kuličkového šroubu ve spojení s rotačním snímačem nebo z přímého odměřování lineárním snímačem polohy (pravítka). Pokud je poloha pohonu snímána rotačním snímačem, pak má kuličkový šroub dvojí funkci: jako součást pohonu musí přenášet vysoké síly, ale současně je od něj očekávána přesnost a konstantní stoupání při odměřování polohy. Polohová smyčka však vyhodnocuje pouze údaje rotačního snímače. Vzhledem k tomu, že opotřebení šroubu a plovoucí lokální změny teplot mechaniky pohonů nelze kompenzovat, hovoříme v tomto případě o tzv. semiclosed loop, tedy nepřímé polohové vazbě. Chyba polohování pohonů není opakovatelná a může podstatně ovlivnit kvalitu obrobků. [10]



Obr. 9. Princip rotačního snímače. [6]

Je-li poloha snímána přímým odměřováním pohybu saní, tedy lineárním snímačem polohy, vyloučí polohová vazba vliv mechaniky posuvu. V tomto případě hovoříme o přímé polohové vazbě. Vůle a nepřesnosti v přenosové kinematické soustavě nemají vliv na přesnost záznamu polohy. Přesnost měření závisí prakticky na přesnosti a umístění snímače polohy na stroji. [10]



Obr. 10. Princip lineárního snímače. [24]

Úspěšné obrábění vyžaduje teplotně stabilizovaný obráběcí stroj, nejen po stránce vlastní konstrukce, ale i teploty dílny, ve které je nasazen. Proměnlivé zatížení by nemělo mít významný vliv na přesnost stroje. Posuvové osy musí držet přesnost v celém rozsahu zdvihu i při velkých změnách posuvů a řezných sil. Rušivý vliv má rychlostní a silové oteplení kuličkového šroubu, kde může po 20 minutách obrábění vzniknout polohová odchylka až $100\ \mu\text{m}$ při použití rotačního snímače pro měření polohy nástroje, vestavěného v motoru pohonu. Odstranění těchto jevů je vázáno na použití přímého odměřování polohy nástroje lineárními snímači polohy. [10]

2 NORMY ZABÝVAJÍCÍ SE MĚŘENÍM PŘESNOSTI CNC STROJŮ

Přesnost a opakovatelnost nastavení polohy obráběcích strojů jsou jejich klíčové ukazatele a indikují předpokládanou úroveň vlastností stroje. Existuje řada norem a směrnic zabývajících se polohováním obráběcích strojů. Liší se od sebe analyzačními postupy a definicemi klíčových parametrů. V důsledku toho jsou vyhodnocené parametry polohování obráběcích strojů různé, podle použité normy. [11]

2.1 Všeobecný přehled norem zabývajících se polohováním CNC strojů

- **ISO 230 – 2: 2006** – specifikuje zkušební postupy použité k určení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách. Zkoušky jsou určeny pro měření relativního posunutí mezi zařízením, které upíná nástroj a zařízením, které upíná obráběný díl. [5]
- **VDI/DGQ 3441** (Německo) – v této normě se definují a popisují pojmy, způsoby a metody pro statistické zkoušky jak pracovní přesnosti, tak i polohovací přesnosti obráběcích strojů. Směrnice pojmenovává charakteristické veličiny, jež mají být měřeny a zároveň dává doporučení o jednotné formě jejich znázornění. [12]
- **ASME B5.54 – 2005** (USA) – norma je komplexní a obsahuje metody specifikace geometrických parametrů obráběcích strojů a metody určení přesnosti a opakovatelnosti. Obsahuje také informace o vlivu prostředí a teplotních nejistotách. [11]
- **JIS B 6330 – 1980** (Japonsko) – norma popisuje metody pro určení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy obráběcích strojů. [11]

2.2 Normy ČSN ISO 230 – Zásady zkoušek obráběcích strojů

Účelem ISO 230 je normalizace metod pro zkoušení přesnosti obráběcích strojů, vyjma přenosného elektrického nářadí.

2.2.1 ČSN ISO 230-1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění

Cílem této části ISO 230 je normalizovat metody zkoušení přesnosti obráběcích strojů, které pracují buď bez zatížení, nebo za dokončovacích podmínek obrábění, pomocí geometrických zkoušek nebo zkoušek obráběním. Metody lze použít i na jiných typech pracovních strojů, kterých se zkoušky geometrické a pracovní přesnosti týkají.

Tato část ISO 230 se týká strojů se strojním pohonem, v ruce při práci nepřenosi, které mohou být použity pro obrábění kovů, dřeva atd. odběrem třísek nebo plastickou deformací.

Tato část ISO 230 se vztahuje pouze na zkoušky přesnosti. Nezabývá se ani funkčními zkouškami stroje (vibrace, trhavé pohyby částí atd.), ani zjišťováním charakteristických parametrů (otáčky, posuvy), neboť tyto zkoušky mají být obvykle provedeny před zkouškami přesnosti.

Jestliže měřicí metoda, která není v této normě popsána, může poskytnout stejné nebo lepší možnosti při měření vlastností, které mají být posuzovány, může být takováto metoda použita. [4]

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

Tato část ISO 230 specifikuje metody zkoušek a vyhodnocení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v osách číslicově řízených strojů přímým měřením v jednotlivých osách. Tyto metody se použijí stejně jak na lineární osy, tak na osy otočné. Pokud se měří ve více osách současně, tato metoda se nepoužívá. Tato část ISO 230 může být použita při typové zkoušce, při přejímací zkoušce, při porovnávacích zkouškách, při periodickém ověření, při korekci stroje atd. Použité metody jsou založeny na opakovaném měření v každé poloze. Příslušné parametry jsou definovány a vypočítávány. [5]

2.2.3 ČSN ISO 230-3: Určení tepelných vlivů

Tato část ISO 230 stanovuje tři zkoušky pro určení tepelných vlivů na obráběcí stroj:

- Zkouška pro určení chyby vzniklé v důsledku kolísání environmentální teploty (ETVE);
- Zkouška tepelných deformací způsobených otáčením vřetena;
- Zkouška tepelných deformací způsobených pohybem v lineárních osách.

Zkoušky tepelných deformací způsobených pohybem v lineárních osách jsou použitelné pouze u číslicově řízených (NC) strojů a jsou navrženy proto, aby kvantifikovaly vliv teplotního délkového roztahování a smršťování v osách stejně jako úhlové deformace struktury stroje. Z praktických důvodů se metody zkoušek vztahují na stroje s délkou lineárních os do 2 000 mm. Pokud jsou tyto metody použity u strojů s délkou os větší než 2 000 mm, měla by být pro zkoušky zvolena reprezentativní délka 2 000 mm v normálním pracovním rozsahu každé osy. Zkoušky odpovídají zkouškám driftu podle ISO/TR 16015 a definují vyhodnocení a detailní postup pro obráběcí stroj. [13]

2.2.4 ČSN ISO 230-4: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených strojů

Tato část ISO 230 specifikuje metody zkoušek a vyhodnocení dvousměrné odchylky kruhovitosti, průměrné dvousměrné radiální odchylky, odchylky kruhovitosti a radiální odchylky kruhové dráhy, která je tvořena současným pohybem ve dvou lineárních osách. Účelem této části normy ISO 230 je stanovit metody pro měření tvarů vykonávaných pohybů u číslicově řízených obráběcích strojů. [14]

2.2.5 ČSN ISO 230-5: Určení emise hluku

Tato část ISO 230 stanoví metody pro měření hluku obráběcích a tvářecích strojů pevně umístěných na podlahu a souvisejících pomocných zařízení přímo v dílně. Účelem měření je zjistit údaje o emisi hluku obráběcích a tvářecích strojů.

Zjištěné údaje mohou být použity pro účely deklarace a ověření emise hluku obráběcích a tvářecích strojů šířeného vzduchem, jak je specifikováno v ISO 4871 a také pro porovnání vlastností různých strojů nebo zařízení téže skupiny ve stanovených podmínkách prostředí při normalizovaných podmínkách montáže a pracovních podmínkách.

Pro účely této části ISO 230 jsou pomocným zařízením míněny hydraulické výkonové zdroje, dopravníky třísek, odsávače olejové mlhy, výměníky tepla, chladicí zařízení atd. Hluk emitovaný centrálně pracujícím pomocným zařízením, připojeným k několika strojům, musí být považován za hluk pozadí.

Jsou uvedeny všeobecné podmínky pro instalaci a pracovní podmínky zkoušeného stroje a pro volbu poloh mikrofonu v místě obsluhy a v dalších stanovených místech. [15]

2.2.6 ČSN ISO 230-6: Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn

Tato část ISO 230 stanovuje zkoušky diagonálního přestavení, které umožňují odhadnutí volumetrických vlastností obráběcího stroje. Úplné vyzkoušení volumetrických vlastností obráběcího stroje je obtížný a časově náročný proces. Zkoušky diagonálního přestavení redukuje čas a cenu spojenou se zkouškami volumetrických vlastností.

Zkouška diagonálního přestavení není diagnostickou zkouškou, ačkoliv z výsledků mohou být někdy možné závěry diagnostického charakteru. Zejména jsou-li zahrnuty zkoušky na diagonálách stěn je možné přímé měření kolmosti os. Zkoušky diagonálního přestavení na diagonálách tělesa mohou být doplněny zkouškami na diagonálách stěn, zkouškami na přímkách rovnoběžných se souřadnými osami podle ISO 230-2, nebo vyhodnocením kruhových interpolací ve třech souřadných rovinách, jak je stanoveno v ISO 230-4. [16]

2.3 Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách dle normy ČSN ISO 230-2: 2006

2.3.1 Termíny a definice

rozsah dráhy v ose (*axis travel*)

největší dráha lineární nebo úhlová, v jejímž rozsahu se může pohyblivá část pomocí číslicového řízení přestavovat

měřený rozsah dráhy (*measurement travel*)

část rozsahu dráhy, která je použita pro měření, zvolena tak, aby jak do první, tak do poslední zadané polohy bylo možné najet dvousměrně (Obr.11)

zadaná poloha (*target position*)

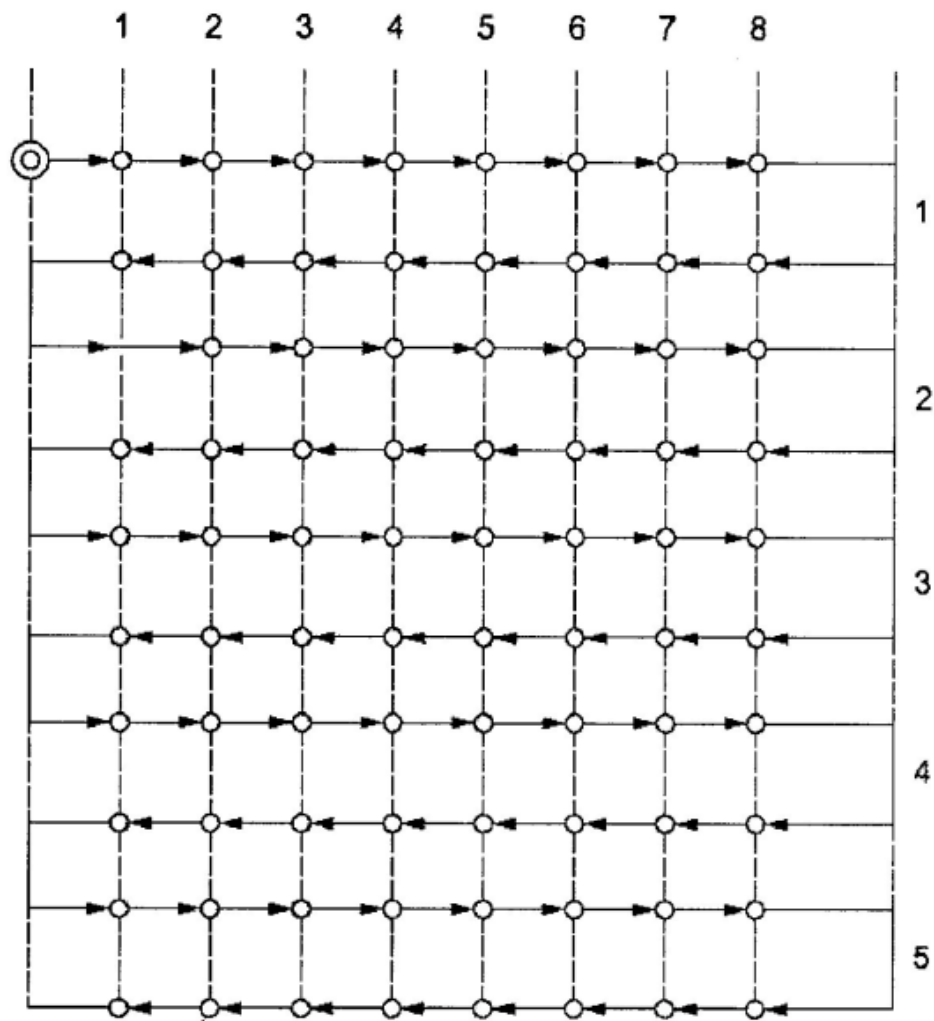
$$P_i (i = 1 \text{ až } m)$$

poloha, do které je programován pohyb pohybuující se části

skutečná poloha (*actual position*)

$$P_{ij} (i = 1 \text{ až } m; j = 1 \text{ až } n)$$

měřená poloha dosažená nastavovanou částí při j -tém nastavení do i -té zadané polohy



Obr. 11. Běžný zkušební cyklus. [5]

úchylnka polohy; polohová úchylnka (*deviation of position; positional deviation*)

rozdíl mezi skutečnou polohou, dosaženou nastavovanou částí a zadanou polohou

$$x_{ij} = P_{ij} - P_i$$

jednosměrný (*unidirectional*)

výraz se vztahuje k sérii měření, při kterých se nastavování do zadané polohy v dané ose vykonává vždy ve stejném směru pohybu

(Značka \uparrow značí, že se jedná o parametr odvozený z měření při nastavování polohy v kladném směru, značka \downarrow se vztahuje k sérii měření, prováděných při nastavování polohy v záporném směru například $x_{ij} \uparrow$ nebo $x_{ij} \downarrow$)

dvousměrný (*bidirectional*)

výraz se vztahuje k sérii měření, při kterých se nastavování do zadané polohy v dané ose vykonává buď ve směru nebo okolo osy

rozšířená nejistota (*expanded uncertainty*)

veličina určující interval výsledků měření, o kterém lze předpokládat, že bude zahrnovat velkou část rozložení hodnot

koeficient rozšíření (*coverage factor*)

číselný koeficient používaný jako násobitel běžné nejistoty pro zjištění rozšířené nejistoty

průměrná jednosměrná polohová úchylka v poloze (*mean unidirectional positional deviation at a position*)

$$\bar{x}_i \uparrow \text{ nebo } \bar{x}_i \downarrow$$

aritmetický průměr polohových úchylek, zjištěných při sérii n najetí do polohy P_i , v jednom směru

$$\bar{x}_i \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \uparrow \quad (2.1)$$

$$\bar{x}_i \downarrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \downarrow \quad (2.2)$$

průměrná dvousměrná polohová úchylka v poloze (*mean bidirectional positional deviation at a position*)

aritmetický průměr průměrných jednosměrných polohových úchylek $\bar{x}_i \uparrow$ a $\bar{x}_i \downarrow$ zjištěných při najíždění do polohy P_i v obou směrech

$$\bar{x}_i = \frac{\bar{x}_i \uparrow + \bar{x}_i \downarrow}{2} \quad (2.3)$$

necitlivost v poloze (*reversal value at a position*)

$$B_i = \bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow \quad (2.4)$$

kde B_i je hodnota rozdílu mezi průměrnými jednosměrnými polohovými úchytkami zjištěnými při najíždění do polohy P_i v obou směrech

necitlivost v ose (*reversal value of an axis*)

největší z absolutních hodnot necitlivostí $|B_i|$ ze všech zadaných poloh podél nebo okolo osy

$$B = \max|B_i| \quad (2.5)$$

průměrná necitlivost v ose (*mean reversal value of an axis*)

aritmetický průměr hodnot necitlivostí B_i ze všech zadaných poloh v dané ose

$$\bar{B} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n B_i \quad (2.6)$$

odhad jednosměrné opakovatelnosti osy nastavení polohy v poloze (*estimator of the unidirectional axis repeatability of positioning at a position*)

$$S_i \uparrow \text{ nebo } S_i \downarrow$$

odhad běžné nejistoty polohových úchytek zjištěných při sérii n najetí do polohy P_i v jednom směru

$$s_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \uparrow - \bar{x}_i \uparrow)^2} \quad (2.7)$$

$$s_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \downarrow - \bar{x}_i \downarrow)^2} \quad (2.8)$$

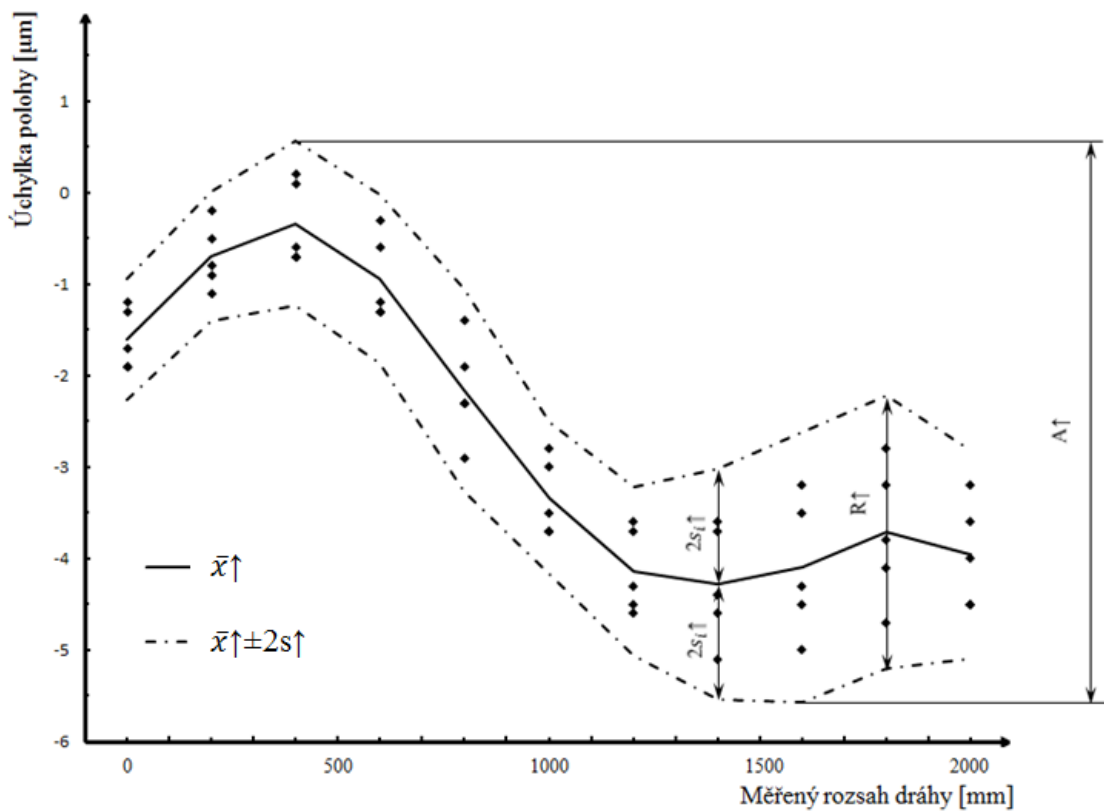
jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze (*unidirectional repeatability of positioning at a position*)

$$R_i \uparrow \text{ nebo } R_i \downarrow$$

rozsah odvozený z odhadu jednosměrné opakovatelnosti osy nastavení polohy v poloze P_i při použití koeficientu rozšíření 2

$$R_i \uparrow = 4s_i \uparrow \tag{2.9}$$

$$R_i \downarrow = 4s_i \downarrow \tag{2.10}$$



Obr. 12. Jednosměrná přesnost a opakovatelnost nastavení polohy. [5]

jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose (*unidirectional repeatability of positioning*)

největší hodnota z opakovatelnosti nastavení polohy v kterékoliv poloze P_i podél nebo okolo dané osy

$$R \uparrow = \max. [R_i \uparrow] \tag{2.11}$$

$$R \downarrow = \max. [R_i \downarrow] \tag{2.12}$$

dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze (*bidirectional repeatability of positioning at a position*)

$$R_i = \max.[2s_i \uparrow + 2s_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow] \quad (2.13)$$

dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose (*bidirectional repeatability of positioning of an axis*)

největší hodnota z opakovatelnosti nastavení polohy v kterékoliv poloze P_i podél nebo okolo dané osy

$$R = \max. [R_i] \quad (2.14)$$

jednosměrná systematická polohová úchylka v ose (*unidirectional systematic positional deviation of an axis*)

rozdíl mezi největší a nejmenší algebraickou hodnotou průměrných jednosměrných polohových úchylek při nastavování polohy v jednom směru $\bar{x}_i \uparrow$ nebo $\bar{x}_i \downarrow$ v jakékoliv poloze P_i které byly zjištěny v kterékoliv poloze podél nebo okolo dané osy

$$E \uparrow = \max. [\bar{x}_i \uparrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow] \quad (2.15)$$

$$E \downarrow = \max. [\bar{x}_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \downarrow] \quad (2.16)$$

dvousměrná systematická polohová úchylka v ose (*bidirectional systematic positional deviation of an axis*)

rozdíl mezi největší a nejmenší algebraickou hodnotou průměrných jednosměrných polohových úchylek při nastavování polohy v obou směrech $\bar{x}_i \uparrow$ nebo $\bar{x}_i \downarrow$, které byly zjištěny v kterékoliv poloze P_i podél nebo okolo dané osy

$$E = \max. [\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] \quad (2.17)$$

průměrná dvousměrná polohová úchylka v ose (*mean bidirectional positional deviation of an axis*)

rozdíl mezi největší a nejmenší algebraickou hodnotou průměrných dvousměrných polohových úchylek \bar{x}_i , které byly zjištěny v kterékoliv poloze P_i podél nebo okolo dané osy

$$M = \max. [\bar{x}_i] - \min. [\bar{x}_i] \quad (2.18)$$

jednosměrná přesnost nastavení polohy v ose (*unidirectional accuracy of positioning of an axis*)

rozsah odvozený ze spojení jednosměrných systematických úchylek a odhadu pro opakovatelnost při jednosměrném nastavení polohy při použití koeficientu rozšíření 2

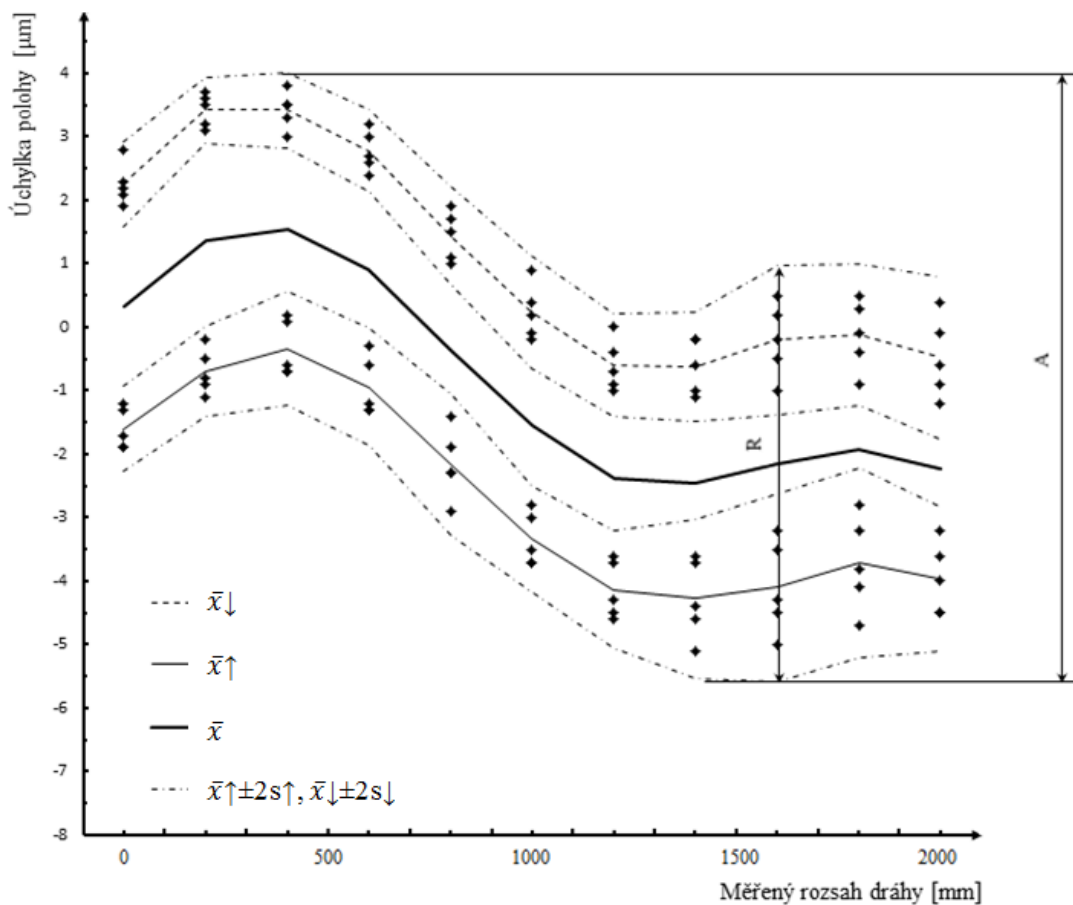
$$A \uparrow = \max. [\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow] \quad (2.19)$$

$$A \downarrow = \max. [\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow] \quad (2.20)$$

dvousměrná přesnost nastavení polohy v ose (*bidirectional accuracy of positioning of an axis*)

rozsah odvozený ze spojení dvousměrných systematických úchylek a odhadu pro opakovatelnost při dvousměrném nastavení polohy při použití koeficientu rozšíření 2. [5]

$$A = \max. [\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow] \quad (2.21)$$



Obr. 13. Dvousměrná přesnost a opakovatelnost nastavení polohy. [5]

2.3.2 Environment

Doporučuje se, aby dodavatel/výrobce předložil pokyny týkající se charakteru teplotního environmentu, který je akceptovatelný pro splnění specifikované přesnosti stroje. [5]

Takovéto všeobecné pokyny by měly například obsahovat specifikace průměrné teploty místnosti, největší rozsah velikosti a frekvence odchylek od této průměrné teploty a environmentální teplotní gradienty. Odpovědností uživatele je zajistit akceptovatelný teplotní environment pro provoz stroje a pro jeho zkoušky v místě instalace. Jestliže však uživatel splní pokyny předložené dodavatelem/výrobce, přechází odpovědnost za splnění vlastností stroje podle specifikací na dodavatele/výrobce. [5]

Ideálně se všechna měření rozměrů provádějí za podmínek, kdy jak měřicí přístroje, tak měřený subjekt jsou umístěny v environmentu s teplotou 20 °C. Jsou-li měření prováděna při jiných teplotách než 20 °C, je nutné pro opravu výsledků na teplotu 20 °C použít korekci jmenovitého diferenciálního tepelného roztažení (NDE) mezi systémem nastavování polohy v ose nebo obrobkem/upínacím zařízením stroje a zkušebním zařízením. Tyto podmínky mohou vyžadovat měření teploty reprezentativní části systému nastavování polohy stroje a teploty reprezentativní části měřicího zařízení a matematickou korekci s použitím relevantních teplotních expansních koeficientů. Korekce NDE může být dosažena automaticky, jestliže reprezentativní část stroje a zkušební zařízení mají stejnou teplotu a stejný teplotní expansní koeficient. [5]

Stroj a, je-li to důležité, měřicí přístroje musí být ve zkušebním environmentu dostatečně dlouho (přednostně přes noc), aby před měřením dosáhly tepelně stabilních podmínek. Stroj a měřicí přístroje musí být chráněny před průvanem a vnějším zářením, jako jsou např. sluneční paprsky, tepelné zářiče atd.. [5]

V průběhu 12-ti hodin před měřením a v průběhu měření musí být environmentální teplotní gradient ve stupních za hodinu v rozsahu limitů, dohodnutých mezi dodavatelem/výrobce a uživatelem. [5]

2.3.3 Zkoušený stroj

Stroj musí být kompletně smontován a plně funkční. Před začátkem měření přesnosti a opakovatelnosti musí být uspokojivě dokončeno nutné vyrovnaní stroje na základě a geometrické zkoušky.

Jsou-li při zkušebním cyklu použity vestavěné kompenzační programy, musí to být ve zkušebním protokolu uvedeno.

Všechna měření musí být provedena na nezatíženém stroji, tj. bez obrobku.

Polohy saní nebo pohyblivých součástí v osách, ve kterých se neměří, musí být uvedeny ve zkušebním protokolu.

Stroj musí být programován tak, aby se nastavovaná část pohybovala podél nebo okolo osy do řady zadaných poloh, ve kterých vždy zůstane v klidu dostatečně dlouho, aby mohla být dosažená skutečná poloha dosažena, změřena a zaznamenána. Stroj musí být programován tak, aby se pohyb mezi zadanými polohami vykonával dohodnutou rychlostí. [5]

2.3.4 Temperace stroje

Aby byl stroj měřen za normálních pracovních podmínek, musí měření předcházet vhodný temperační postup, specifikovaný dodavatelem/výrobcem stroje nebo dohodnutý mezi dodavatelem/výrobcem a uživatelem.

Pokud nejsou podmínky specifikovány, temperační postup smí mít omezené „přípravné pohyby“ pouze na takové, které jsou nutné pro seřízení měřicího zařízení. Temperační postup musí být uveden ve zkušebním protokolu.

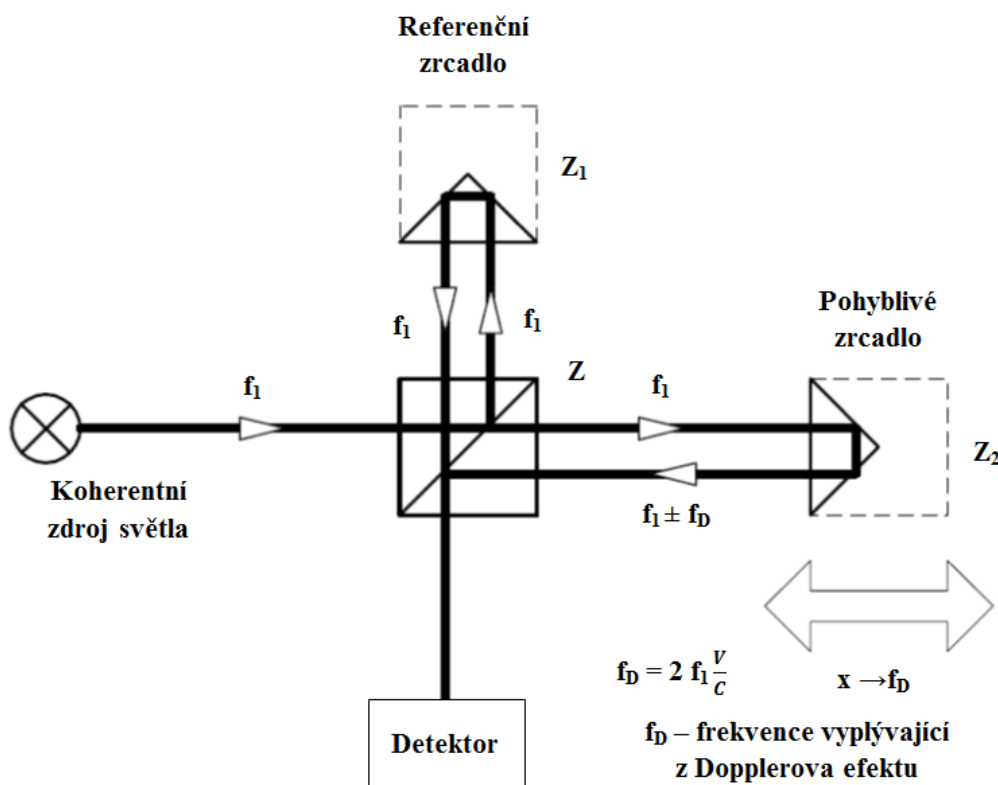
Nestabilní teplotní podmínky se projeví jako řízený nárůst úchylek mezi následnými najetími do určité zadané polohy. Tyto trendy by měly být temperací stroje minimalizovány. [5]

3 MĚŘENÍ POLOHOVÁNÍ OBRÁBĚCÍCH STROJŮ POMOCÍ LASEROVÉHO INTERFEROMETRU

Princip laserové interferometrie je založen na interferenci světla. Interferometry, které se používají k měření délek se nazývají interferenční komparátory. K měření indexů lomu u plynů a kapalin se pak nazývají interferenční refraktometry. Interferenční spektroskopy se zase používají k určení jemné struktury spektrálních čar. Z interferenčních komparátorů je pro většinu měření nejvhodnější Michelsonův komparátor. Jeho princip popsal poprvé roku 1881 americký vědec Albert Abraham Michelson (1852-1931). [17]

3.1 Základní princip interferometru

Michelsonův interferometr sestává ze zdroje světla jedné vlnové délky (monochromatické světlo), zpola postříbřeného zrcadla a dvou dalších zrcadel. I když moderní interferometry, jako XL-80, jsou důmyslnější a měří vzdálenosti s přesností v řádu 1 ppm a vyšší, stále používají základní principy Michelsonova interferometru. [18]



Obr. 14. Michelsonův interferometr. [19]

Koherentní paprsek světla dopadá na polopropustné zrcadlo. Toto zrcadlo dělí zdrojový paprsek na dva. První jde do referenční větve a odráží se od referenčního zrcadla Z_1 , druhý paprsek pokračuje do měřicí větve a odráží se od pohyblivého zrcadla Z_2 . Odražené paprsky se opět potkávají v detektoru. Protože oba odražené paprsky pocházejí ze stejného zdroje koherentního světla, budou interferovat. Když se bude pohyblivé zrcadlo přemísťovat, potom se frekvence odraženého paprsku v měřicí větvi bude měnit. Detektor počítá frekvenční rozdíl mezi odraženými paprsky f_D . Naměřená hodnota je určena podle vztahu:

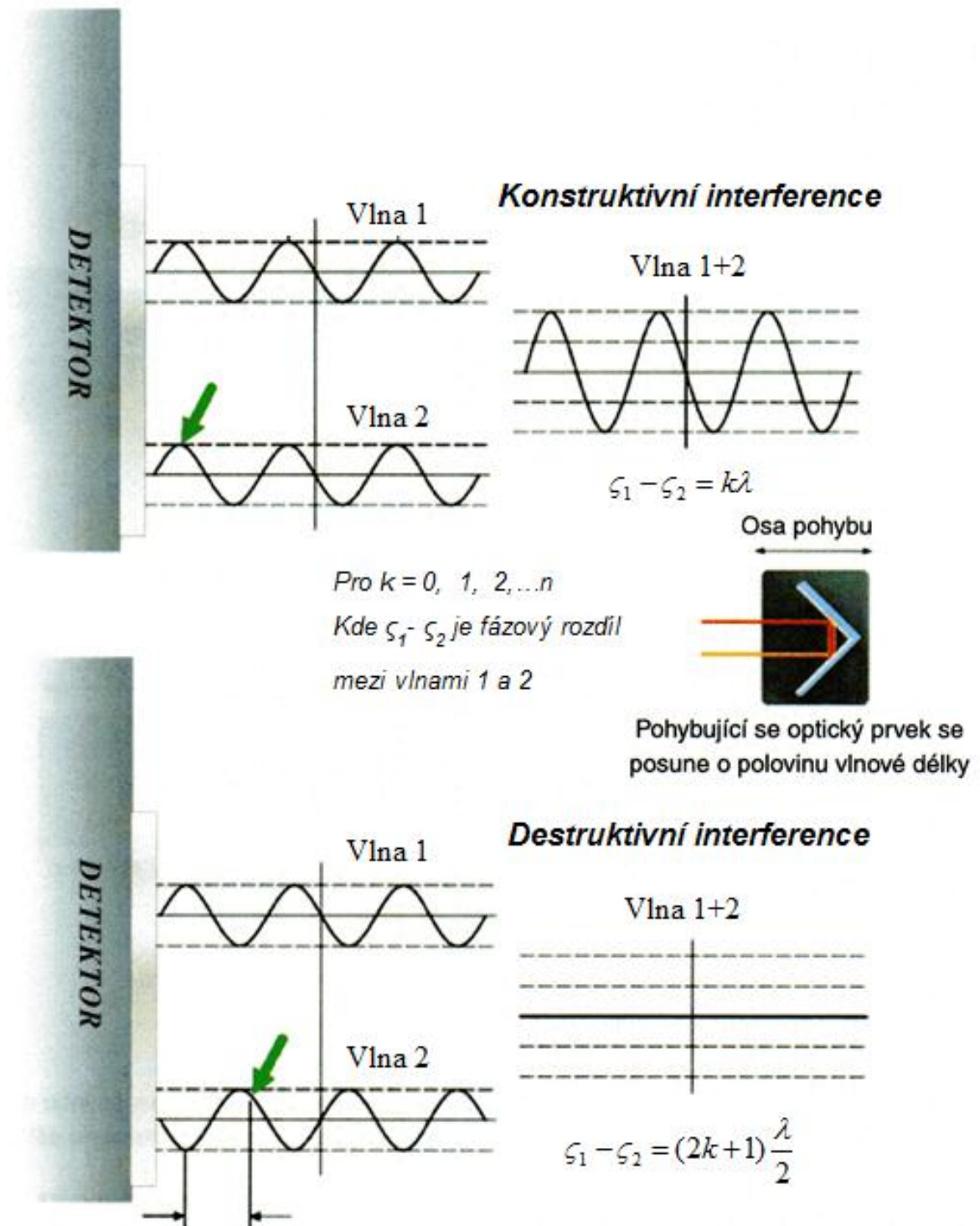
$$L = f_D \cdot \frac{\lambda}{2} = N \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (3.1)$$

kde: N – počet pulsů,

λ – vlnová délka. [19]

Jestliže se rozdíl v délce dráhy nemění, detektor snímá signál kolísající mezi extrémními hodnotami konstruktivní a destruktivní interference při každé změně trasy. Tyto změny (proužky) jsou spočteny a použity k výpočtu změny rozdílu mezi dvěma délkami dráhy. Naměřená délka se bude rovnat počtu proužků násobeného přibližně polovinou vlnové délky paprsku. [18]

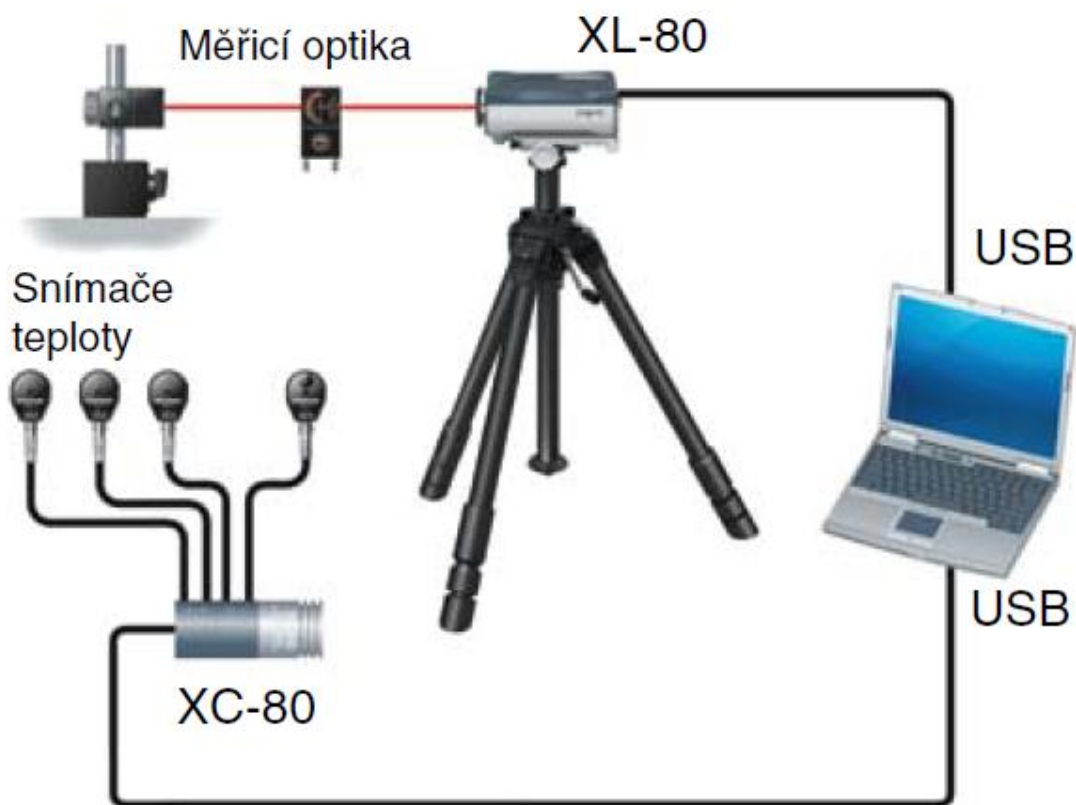
Vlnová délka paprsku bude záviset na indexu lomu vzduchu, kterým paprsek prochází. Protože se index lomu vzduchu bude měnit v závislosti na teplotě, tlaku a relativní vlhkosti, hodnota vlnové délky, použitá k výpočtu naměřených hodnot bude vyžadovat kompenzaci v důsledku změn těchto parametrů okolního prostředí. [18]



Obr. 15. Princip konstruktivní a destruktivní interference. [18][20]

3.2 Laserový systém Renishaw XL-80

Laser XL-80 vytváří mimořádně stabilní svazek laserového záření s vlnovou délkou odpovídající národním a mezinárodním normám. Stabilita frekvence vyzařované vlnové délky je $\pm 0,05$ ppm za 1 rok a $\pm 0,02$ ppm za 1 hodinu. Těchto vynikajících hodnot je dosaženo dynamickou teplotní stabilizací délky laserové trubice v řádu nanometrů. Zaručená přesnost (nejistota) lineárního měření je $\pm 0,5 \mu\text{m/m}$ v celém rozsahu podmínek prostředí, tj. při teplotě $0 \text{ }^\circ\text{C} - 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ($32 \text{ }^\circ\text{F} - 104 \text{ }^\circ\text{F}$) a tlaku $650 \text{ mbar} - 1150 \text{ mbar}$. Systém čte hodnoty s frekvencí 50 kHz i při maximální rychlosti lineárního měření 4 m/s . Dosahované lineární rozlišení 1 nm je zachováno v celém rozsahu rychlostí měření. [21]



Obr. 16. Laserový systém Renishaw XL-80. [21]

Kompenzátor XC-80 je klíčem k přesnosti měření systémem XL-80. Díky přesnému a pečlivému měření okolních podmínek kompenzuje vlnovou délku laserového paprsku s ohledem na změny teploty, tlaku a relativní vlhkosti vzduchu, čímž prakticky odstraňuje chyby měření plynoucí z těchto změn. XC-80 udržuje vlnovou délku laserového paprsku XL-80 na hodnotě 0,633 μm . [18]

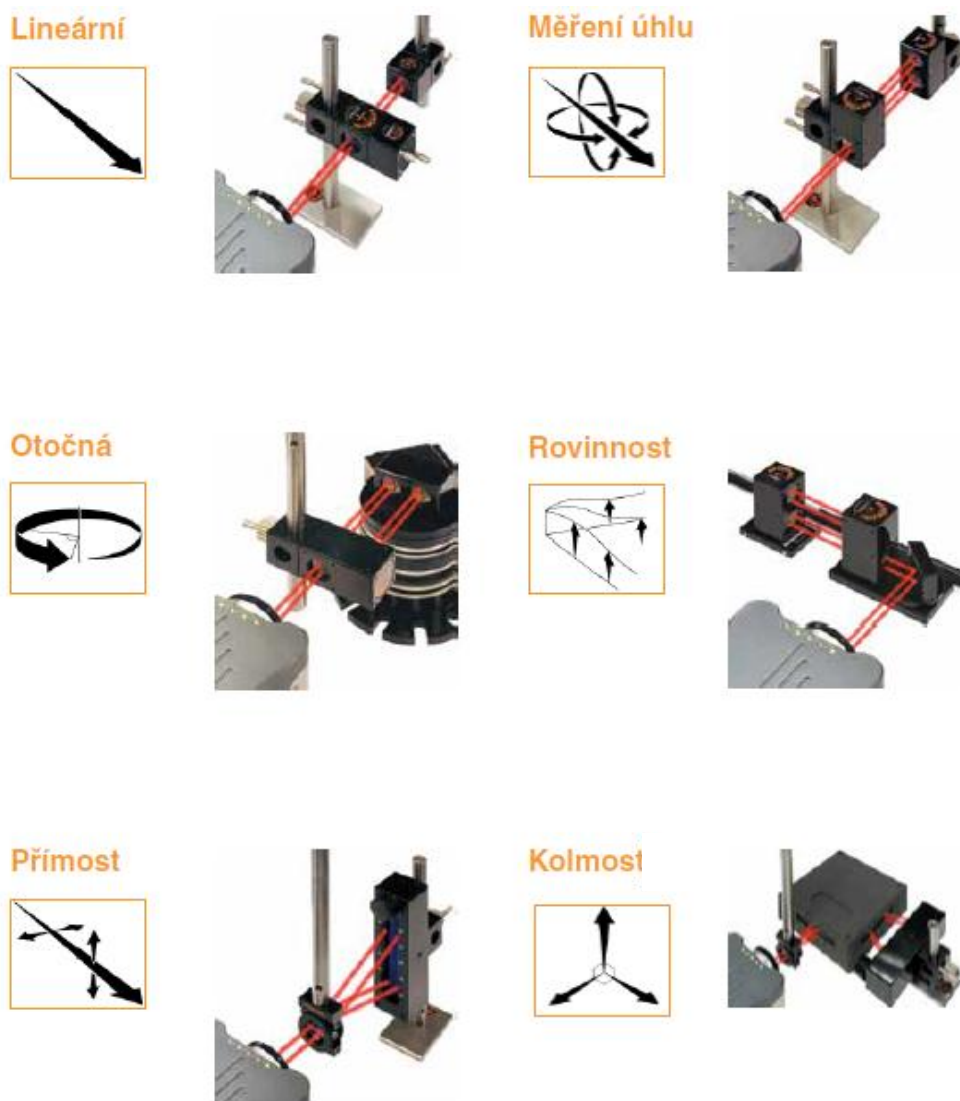


Obr. 17. Kompenzátor XC-80. [18]

Hodnoty zjištěné snímači kompenzátoru XC-80 jsou použity ke kompenzaci laserových měření jen v případě režimu lineárního měření. Není-li kompenzace provedena, mohou změny indexu lomu vzduchu vést ke značným chybám měření. I když je možné zadat podmínky okolního prostředí ručně (pomocí ručních přístrojů apod.), výhodou použití kompenzátoru XC-80 je to, že kompenzace je prováděna přesně a je automaticky aktualizována každých 7 sekund. [18]

Kompenzátor XC-80 je také schopen přijímat vstupní údaje až od tří snímačů teploty materiálu, které měří teplotu stroje nebo testovaného materiálu. Za předpokladu, že do softwaru LaserXL™ byl zadán koeficient tepelné roztažnosti, tento software umožní standardní přepočítání měření na teplotu stroje (materiálu) 20 °C.

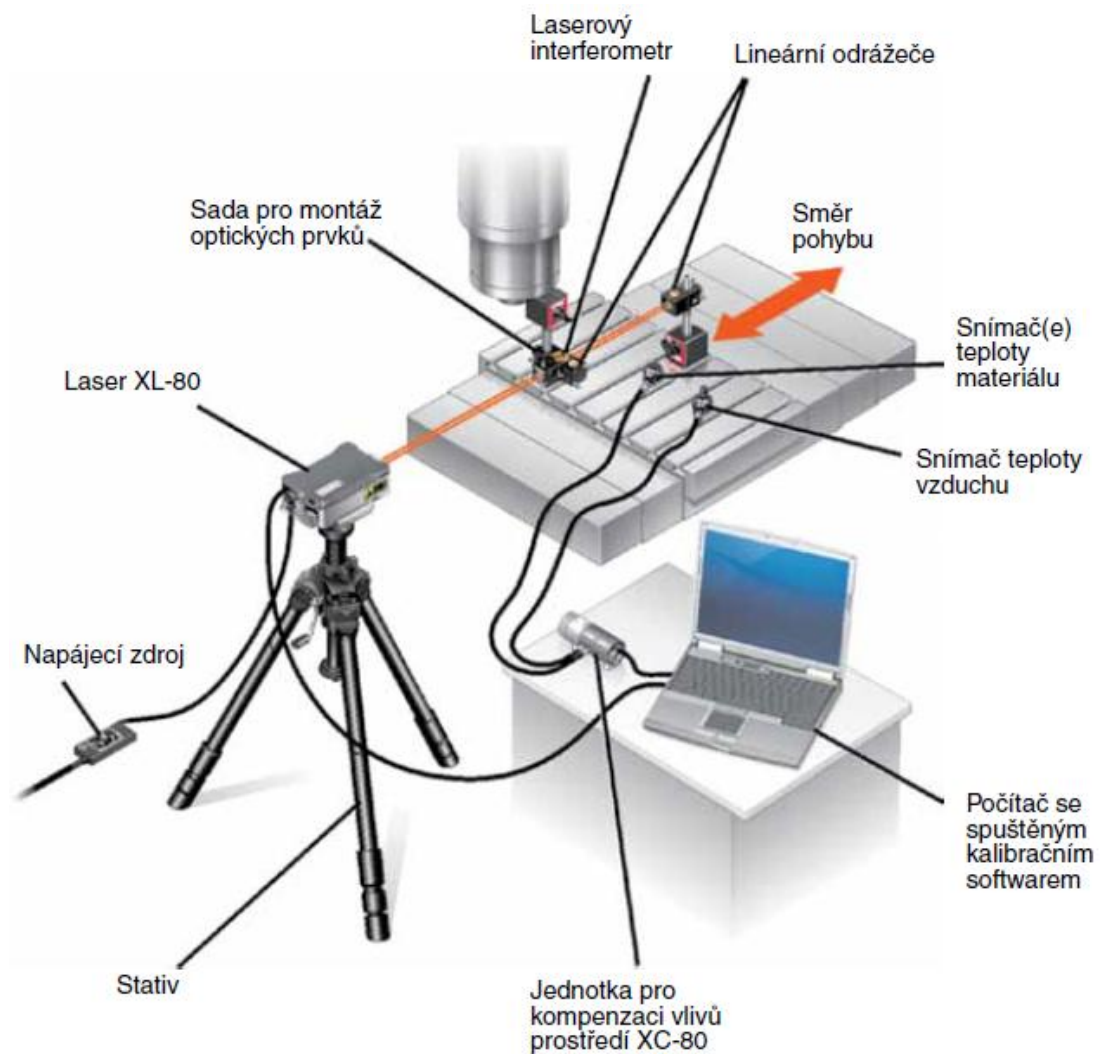
Přesnost lineárních polohových měření závisí na přesnosti známé vlnové délky laserového paprsku. Tato délka je určena nejen kvalitou stabilizace laserového paprsku, ale také parametry okolního prostředí. Zejména hodnoty teploty, tlaku a relativní vlhkosti vzduchu budou ovlivňovat vlnovou délku laserového paprsku (ve vzduchu). [18]



Obr. 18. Možnosti laserového systému XL-80. [18]

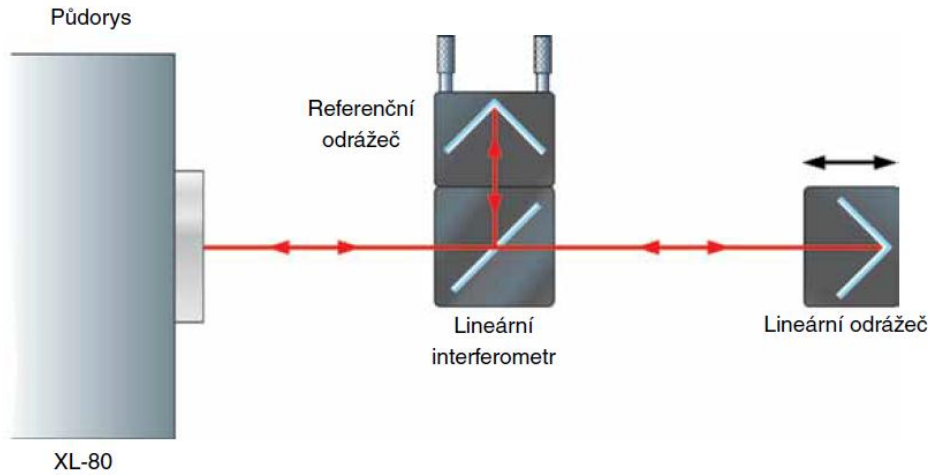
3.2.1 Lineární polohování a opakovatelnost

Lineární měření je nejobvyklejší způsob měření prováděný obráběcími stroji. Laserový systém lze použít k měření přesnosti lineárního polohování a opakovatelnosti stroje porovnáním poloh zobrazených na načtené ose stroje se skutečnými polohami naměřenými laserem. [18]

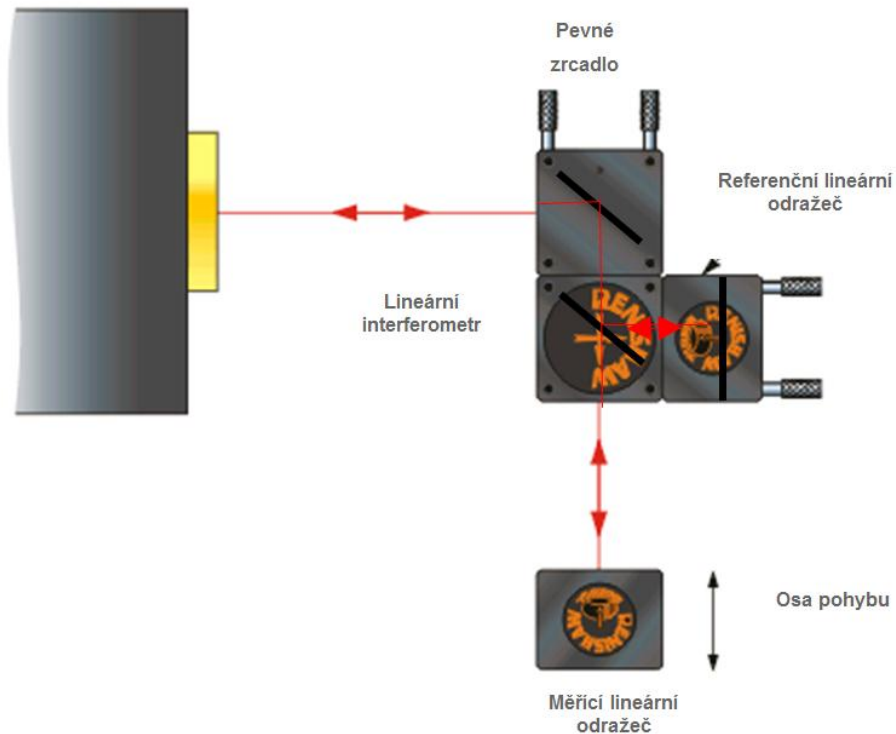


Obr. 19. Sestava laserového systému pro měření lineární polohy. [18]

Při lineárním měření je odražeč připevněn k děliči světla a tvoří referenční rameno interferometru s pevnou délkou. Další odražeč je potom přemístěn vzhledem k děliči světla a tvoří měřicí rameno s proměnnou délkou. Laser je potom použit ke sledování jakýchkoli změn v rozestupu mezi odražečem měřicího ramene a děličem světla. [18]



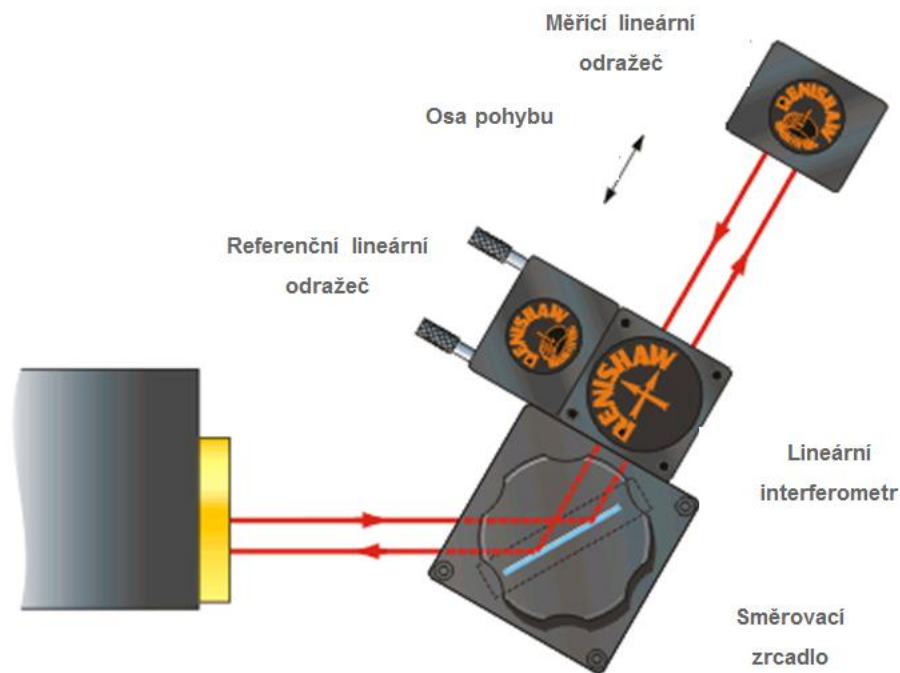
Obr. 20. Sestava optických prvků pro lineární měření. [18]



Obr. 21. Sestava optických prvků pro lineární měření v pravém úhlu. [20]

Pro měření vertikálních os, nebo pokud měříme přesnost polohování obráběcího stroje u něhož nemůžeme ustavit laserovou měřicí hlavu do měřené osy z důvodů neodstranitelných překážek, či v případě zakrytování stroje, můžeme použít další pevné zrcadlo pro lineární měření v pravém úhlu. (Obr. 21)

Pro lineární měření polohování šikmých loží se používá směrovací zrcadlo. (Obr. 22)



Obr. 22. Sestava optických prvků se směrovacím zrcadlem. [18]

3.3 Chyby vznikající nevhodným seřizováním laserinterferometru

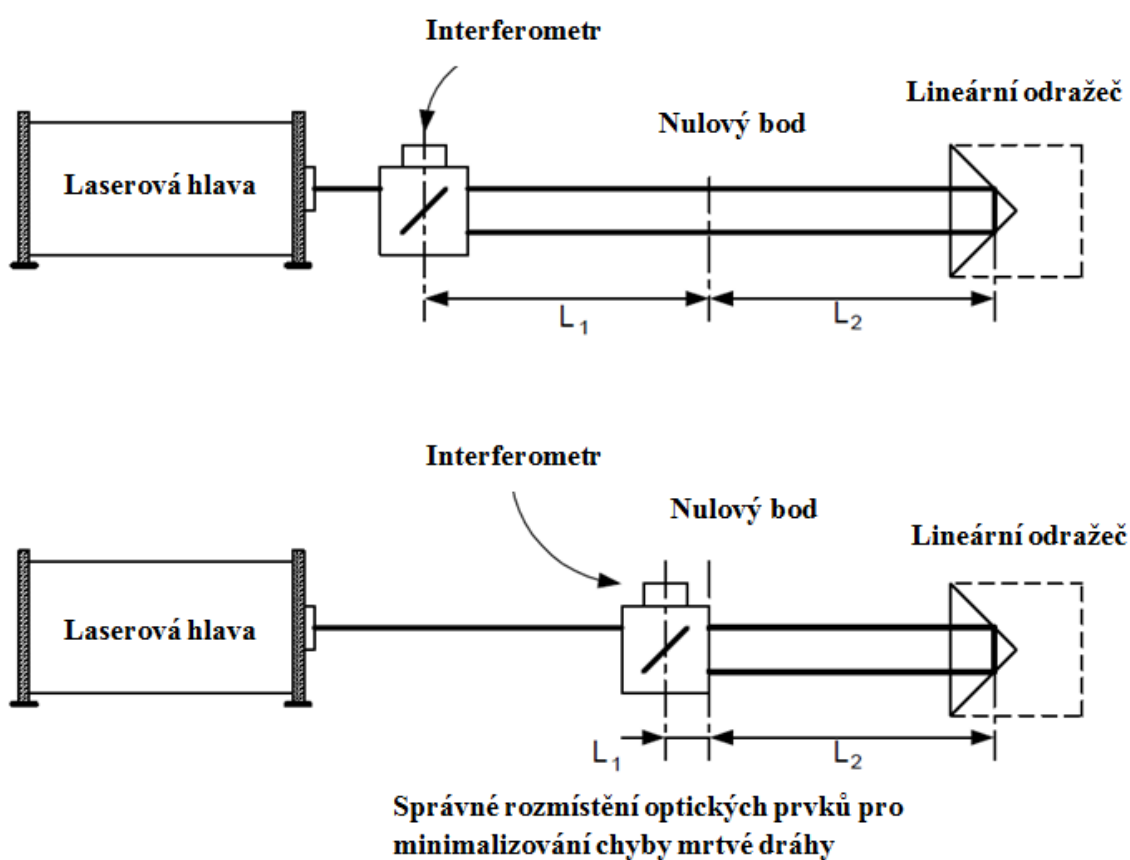
Při délkových měřeních laserinterferometrem mohou v důsledku jeho seřizování vzniknout tři typy chyb.

3.3.1 Chyba vznikající tzv. Mrtvou dráhou

Tato chyba je přidružená ke změnám prostředí, které nastanou během lineárního měření. Za normálních podmínek je chyba mrtvé dráhy bezvýznamná. Chyba mrtvé dráhy u laserového měření vzdálenosti L_2 je závislá na vzdálenosti mezi dvěma optickými prvky při nulování systému.

Pokud nedochází k pohybu mezi interferometrem a reflektorem, a mění se podmínky prostředí v okolí laserového paprsku, pak se vlnová délka ve vzduchu bude měnit podél celé dráhy (L_1+L_2), ale laserový měřicí systém ji bude kompenzovat pouze podél dráhy L_2 . Tím chyba mrtvé dráhy zavedená do paprsku na dráze L_1 nebude kompenzována.

Tato chyba bude ovšem zanedbatelná, pokud se stacionární (interferometr) a pohyblivá optika dotýkají v době, kdy se provádí nulování. [20]



Obr. 23. Znáznornění chyby mrtvé dráhy. [19]

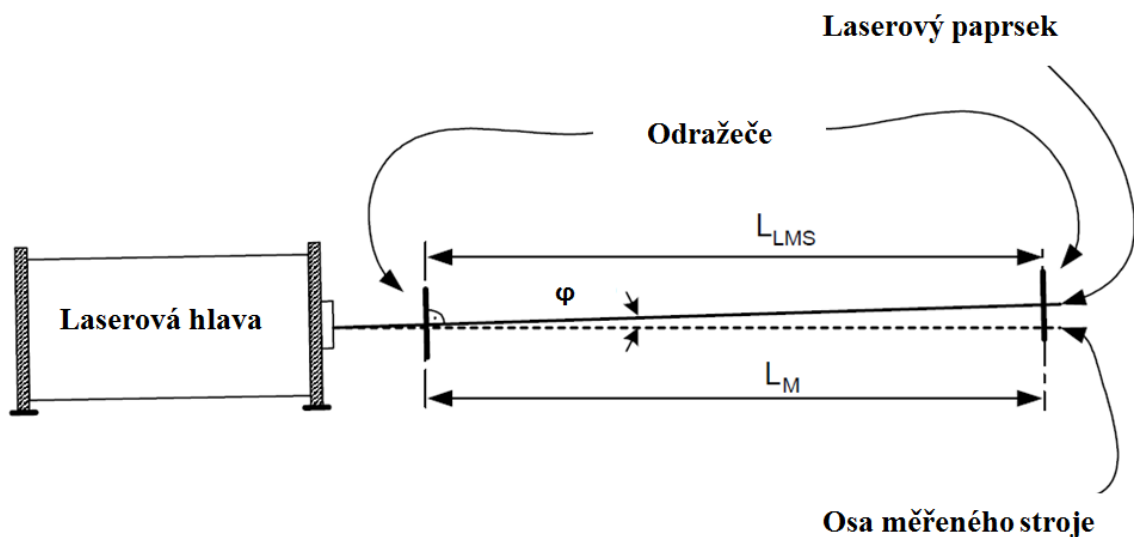
3.3.2 Cosinova chyba

Jestliže laserový paprsek není paralelní s osou měřeného stroje (tzn. optická cesta není správně nastavena), potom dochází k rozdílu mezi skutečnou a měřenou vzdáleností. Tato chyba špatného seřízení je známa jako cosinova chyba, protože její velikost závisí na úhlu mezi laserovým paprskem a osou stroje.

Při chybném ustavení optické cesty bude vzdálenost L_{LMS} , měřená laserinterferometrem, menší než skutečná vzdálenost L_M podle vztahu:

$$L_{LMS} = L_M \cdot \cos\varphi \quad (3.2)$$

Eliminovat cosinovu chybu znamená řádně seřídit laserový paprsek před vlastním měřením. [19]

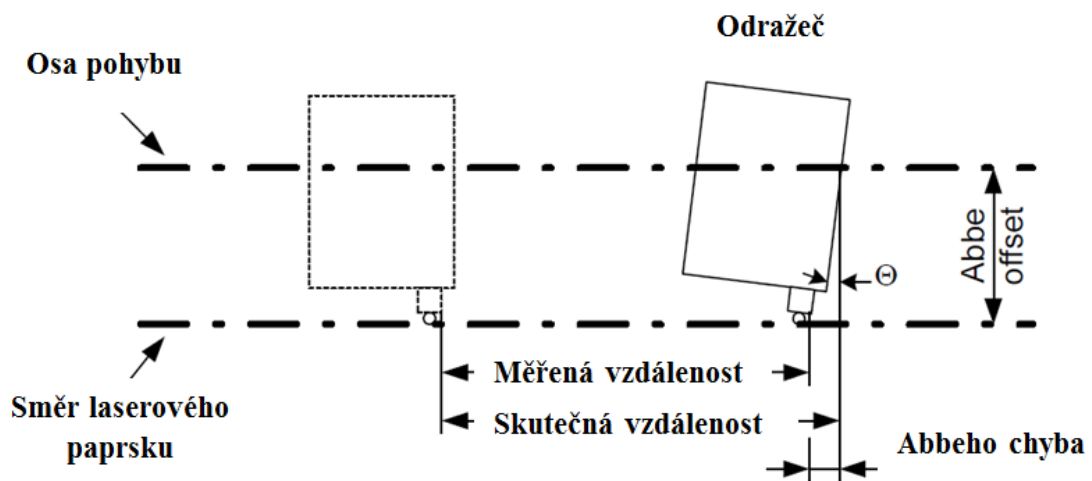


Obr. 24. Znáornění příčiny cosinovy chyby. [19]

3.3.3 Abbeho chyba

Abbeho chyba se vyskytuje, když se měřená část během měření nepohybuje perfektně přímo a když se vlivem úhlových pohybů natočí pohyblivý odražeč. Chyba natočení pohyblivého odražeče je tím větší, čím větší je vzdálenost mezi osou měřeného stroje a osou měřícího paprsku. Tato vzdálenost je nazývána Abbeho odsazení (offset).

Pro minimalizaci Abbeho chyby je důležité ustavení optické cesty laserinterferometru co nejbližše ose pohybu měřeného stroje. [19]



Obr. 25. Znáznornění Abbeho chyby. [19]

3.4 Vliv prostředí na interferometrická měření

Podle rovnice (Rov. 3.1) :

$$L = f_D \cdot \frac{\lambda}{2} = N \cdot \frac{\lambda}{2}$$

je interferometrickou jednotkou měření vzdálenosti vlnová délka laseru (633nm).

Z definice :

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3.3)$$

vyplývá, že vlnová délka závisí na frekvenci laseru f a rychlosti v paprsku v měřicím prostředí. Pokud by měření bylo prováděno ve vakuu, potom $v=c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Rychlost paprsku v prostředí jiném než vakuum (vzduch, voda) je nižší a je určena vztahem:

$$v = \frac{c}{n} \quad (3.4)$$

kde n – koeficient lomu světla

Standardně je koeficient lomu světla n komplexní proměnná nebo dokonce tenzor, ale pro méně přesné výpočty je zjednodušen do konstanty. Koeficient pro vzduch závisí hlavně na tlaku P , teplotě T a vlhkosti H . Závislá $n_{T,P,H}$ pro vzduch byla empiricky určena Edlénem:

$$n_{T,P,H} - 1 = 2,8775 \cdot 10^{-7} \cdot P \frac{1 + 10^{-6} \cdot P \cdot (0,613 - 0,00997 \cdot T)}{1 + 0,003661 \cdot T} + \Delta n \quad (3.5)$$

$$\Delta n = -3,033 \cdot 10^{-9} \cdot H \cdot e^{0,057627 \cdot T} \quad (3.6)$$

Z těchto rovnic získáme koeficient lomu světla závislý na teplotě, tlaku a vlhkosti v obvyklých podmínkách ($T=296\text{K}$, $P=1000\text{hPa}$, $H=50\%$).

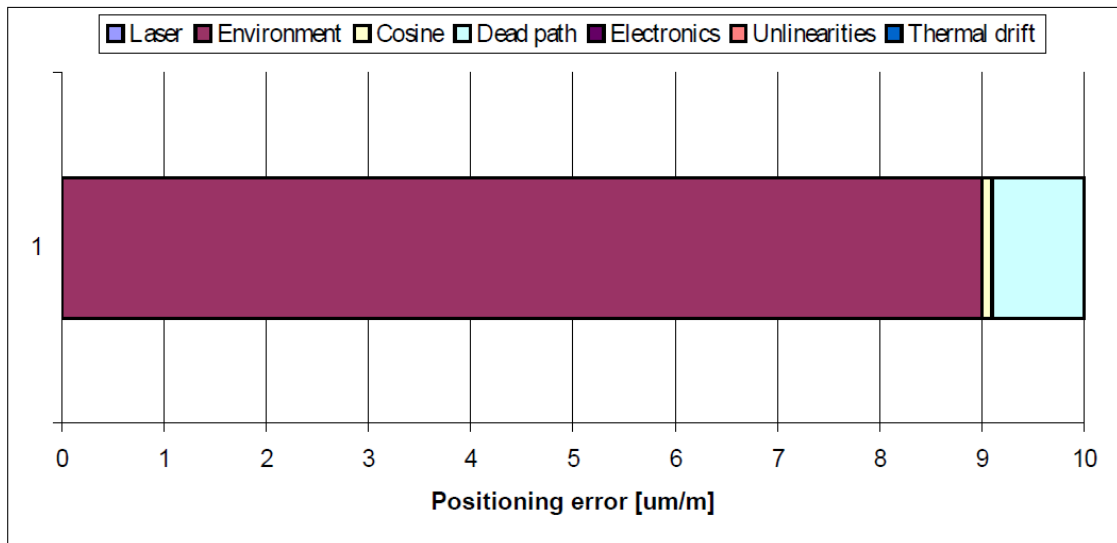
$$\frac{\partial n}{\partial T} = -0,93 \cdot 10^{-6} \left[\frac{1}{\text{K}} \right] \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial n}{\partial P} = +0,27 \cdot 10^{-6} \left[\frac{1}{\text{hPa}} \right] \quad (3.8)$$

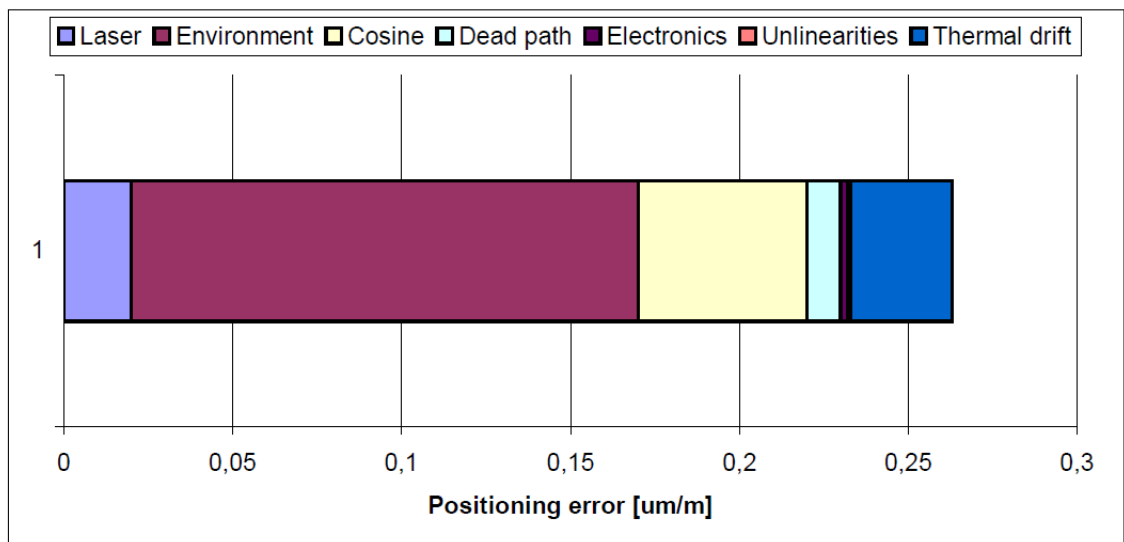
$$\frac{\partial n}{\partial H} = -0,96 \cdot 10^{-8} \left[\frac{1}{\%} \right] \quad (3.9)$$

Je zřejmé, že nejkritičtějším parametrem je teplota, jejíž změna ovlivňuje koeficient n více než tlak a mnohem více než vlhkost. [19]

3.4.1 Chyby nejvíce ovlivňující přesnost laserového systému



Obr. 26. Vyhodnocení chyb laserového měření bez kompenzace vlivu prostředí. [19]



Obr. 27. Vyhodnocení chyb laserového měření s kompenzací vlivu prostředí. [19]

Na obrázcích (Obr. 26) a (Obr. 27) je vidět, jak je důležité kompenzovat vliv prostředí. Oproti chybě plynoucí z nezkompenzovaného vlivu prostředí (parametr s největší vahou je teplota), jsou ostatní chyby méně podstatné.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 POPIS MĚŘENÉ FRÉZKY HWT C-442 CNC

CNC frézky HWT nalézají uplatnění především při výrobě grafitových elektrod, obrábění plastů, hliníku, dřeva apod. Pomocí digitalizačních sond umožňují prostorovou digitalizaci modelů. Frézky HWT jsou rovněž vhodné pro výuku NC programování. [22]

4.1 Obecný popis

Frézky HWT jsou portálové frézky řízené PC. Základní provedení stroje s pracovním prostorem XY:400 mm Z:200 mm umožňuje zpracování nejčastěji se vyskytujících rozměrů obrobků.



Obr. 28. Frézka HWT C-442 CNC profiverze. [22]

Pojezdy jsou poháněny krokovými motory s kuličkovými šrouby. Na všech osách jsou optické kalibry pro definici referenčních bodů, což umožňuje opakovaný nájezd do požadovaného místa i po vypnutí stroje. Vřeteník je osazen motorem 1000 W s plynule nastavitelnými otáčkami. Nástroje se upínají do kleštin ER-16 s upínacím průměrem 1 až 10 mm. Na vřeteníku jsou připevněny hubice pro odsávání. [22]

4.2 Specifikace frézky HWT C-442 CNC

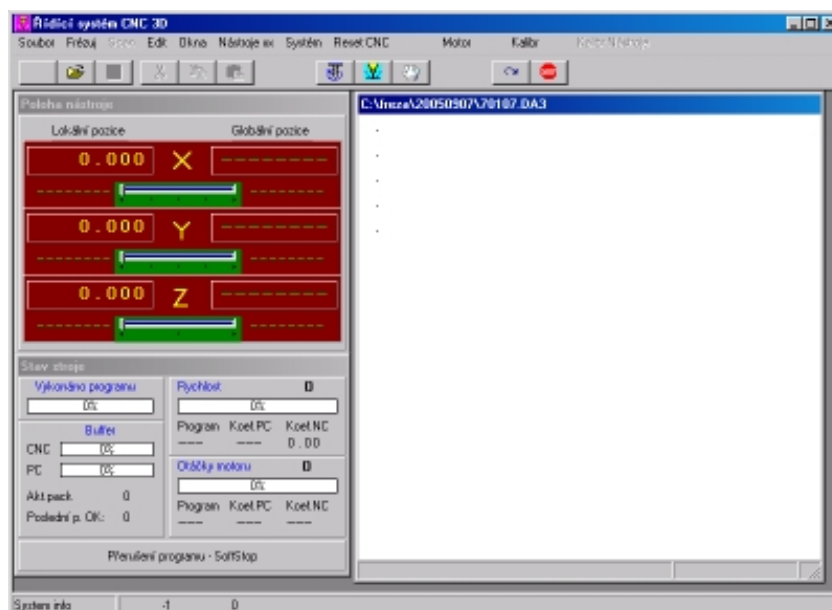
Frézka je vhodná především pro výrobu grafitových elektrod, frézování plastů, dřeva, hliníku apod. Je vybavena kompenzací tepelné dilatace vřeteníku, osvětlením nástroje a pracovního prostoru, odsávacími hubicemi a úplným zakrytíváním. Umožňuje přesné obrábění se zajímavým poměrem cena/výkon. Díky průhlednému zakrytívání obráběcího prostoru je frézka vhodná pro školní účely. [22]

Tab. 1. Základní parametry frézky HWT C-442 CNC. [22]

Obráběcí prostor (X x Y x Z)	400mm x 400mm x 200mm
Velikost upínací plochy (X x Y)	500mm x 500mm; 8mm T-drážky
Programovatelná rychlost posuvu	max. 3m/min
Programovatelný krok	0,00625mm
Otáčky vřetene	2000 – 25000ot./min
Max. upínací průměr nástroje	10mm
Motor vřetene	1000W univerzální
Řídící jednotka	PC
Napájení	230V/50Hz
Příkon	2300VA
Vnější rozměry (š x h x v)	1200mm x 1000mm x 1400mm
Hmotnost	410kg
Materiál obrobku	grafit, plasty, dřevo, barevné kovy
Max. hmotnost obrobku	20kg

4.2.1 Řídicí systém

Frézky HWT jsou řízeny řídicím systémem COMETS. Řídicí systém zpracovává NC kód ve formátu ISO (G-kódy), HPGL a APT. Frézovat je možno buď ručně nebo podle NC programu. Řídicí program zjišťuje krajní polohy nástroje, vypočítá délku dráhy, umožňuje jednoduchou grafickou simulaci NC programu a to jak před, tak i během frézování a zajišťuje kontrolu vyjetí nástroje z pracovního prostoru. Rychlost posuvu je určována NC programem a koeficientem zrychlení obrábění, který je možno kdykoliv plynule měnit. Řídicí systém kontroluje zatížení obráběcího nástroje. Při překročení nastavené hodnoty automaticky zpomaluje posuv a počká, až nástroj materiál odebere a teprve pak pokračuje dál pracovní rychlostí. To usnadňuje obrábění složitých tvarů a umožňuje práci i s nevhodně zvolenými hodnotami posuvů v NC programu, dále zajišťuje ochranu nástroje a materiálu před poškozením, což má hlavně význam při použití malých nástrojů. Tato funkce je v činnosti i při ručním frézování. Pokud přetížení nástroje překročí nastavenou dobu, systém zastaví všechny posuvy, vypne vřetenový motor a zobrazí zprávu o přetížení motoru s dotazem na pokračování v činnosti. Nedochází tedy ke ztrátě dat ani polohy a je možno pokračovat v obrábění. Proto jsou frézky HWT vhodné k výuce NC programování. Řídicí program dále umožňuje po výměně nástroje jeho automatickou délkovou korekci, což usnadňuje práci s více obráběcími nástroji. [22]



Obr. 29. Interface řídicího systému COMETS. [22]

5 MĚŘENÍ POLOHOVÁNÍ LASERINTERFEROMETREM

Měřená frézka byla zapnuta a po aktivaci řídicího systému byly najety referenční body pro jednotlivé osy. Pracovní prostor stroje byl očištěn od zbytků z předešlého obrábění. Svěrák, který byl vyrovnán, byl ponechán upnut na pracovním stole. Z důvodu ustavení optických prvků laserinterferometru musely být demontovány některé části ochranných krytů stroje.

5.1 Nastavení laseru před vyrovnáním paprsku

Laserová hlava byla postavena na stativ a přibližně vyrovnána s měřenou osou. Dříve než se laser vyrovnal posunutím nebo nastavením stativu, byly veškeré nastavení stolku laseru včetně výškového nastavení stativu přenastaveny na střed rozsahu pro zajištění všech dostupných jemných nastavení pro pozdější využití.

Po přibližném ustavení byl laser vyrovnán vodováhou v podélném i příčném směru.

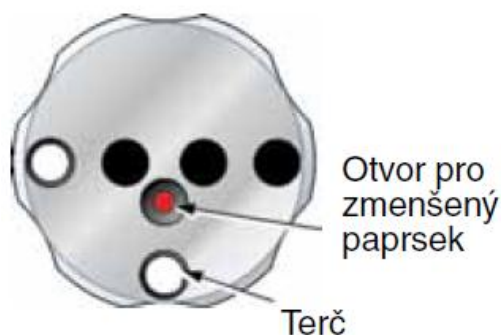


Obr. 30. Vyrovnání laseru vodováhou.

5.2 Ustavení optických prvků laserinterferometru

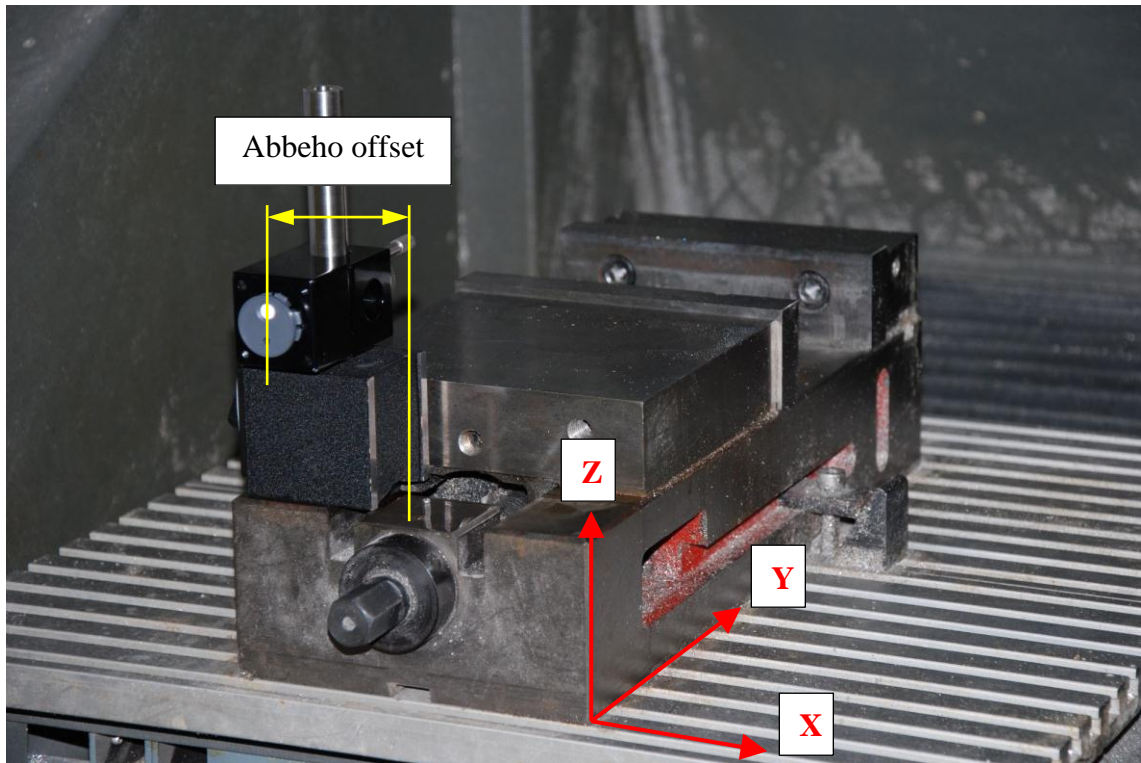
Aby byl přijímaný signál dostatečně silný podél celé osy pohybu stroje a byly minimalizovány chyby měření kosinu, musí být paprsek vyzařovaný laserem XL-80 vyrovnán tak, aby byl rovnoběžný s osou pohybu.

Clona laseru byla otočena do polohy, ve které je vyzařován paprsek o menším průměru. Menší průměr paprsku usnadňuje zjištění jakéhokoliv nesprávného vyrovnání.



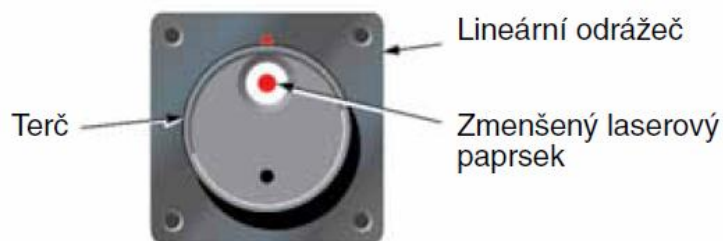
Obr. 31. Nastavení clony laseru pro menší průměr paprsku (ilustrace). [18]

Protože byl na pracovním stole ponechán vyrovnaný upnutý svěrák, nebylo možno ustavit lineární odražeč nad osu pohybového šroubu směru Y. Tím vznikl Abbeho offset ve směru osy X o velikosti cca 50mm, který mohl zvětšit případnou úhlovou chybu vybočení (yaw error) při měření polohování v ose Y.



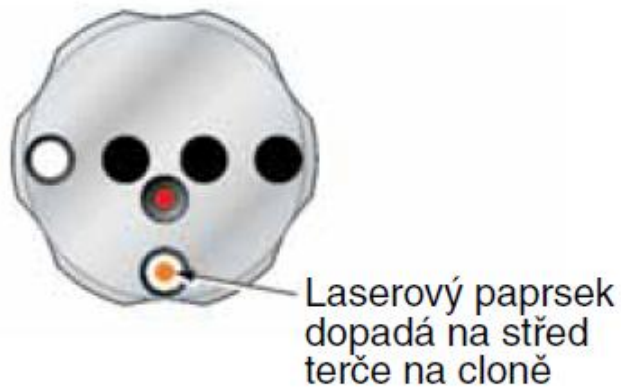
Obr. 32. Ustavení lineárního odražeče na stroj.

Pracovní stůl byl ve směru měřené osy nastaven co nejbliž laseru a na lineární odražeč se připevnil terč s bílou tečkou nahoře. Nastavení polohy laseru bylo seřízeno tak, aby paprsek dopadal na bílou tečku na terči.



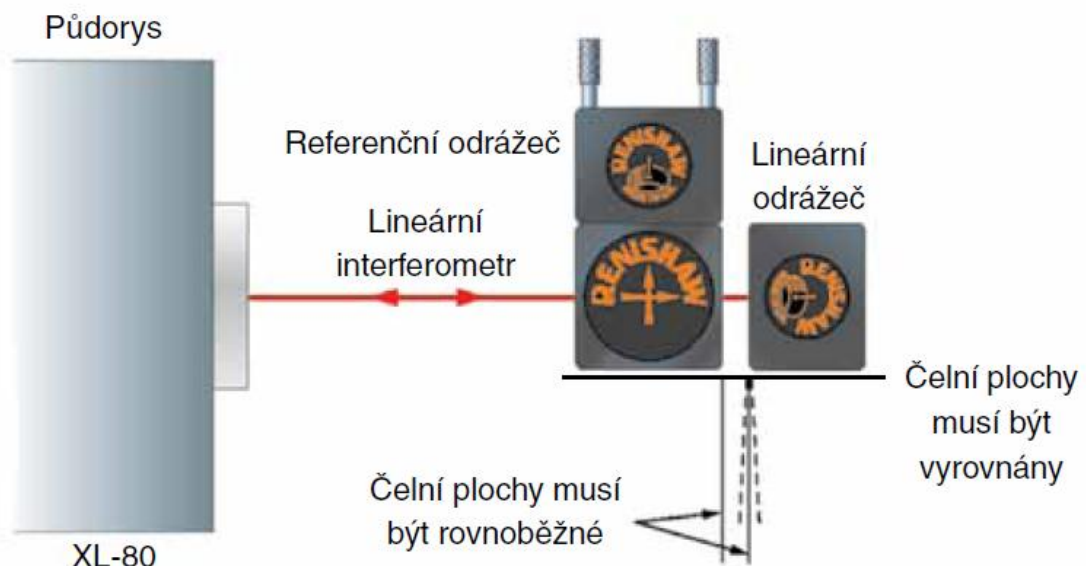
Obr. 33. Zmenšený laserový paprsek na terči lineárního odražeče (ilustrace). [18]

Po odstranění terče bylo zkontrolováno zda paprsek vracející se z lineárního odražeče dopadá na střed terče na cloně laseru. Pro korekci odchylek paprsku bylo použito jemné nastavení laserové hlavičky.

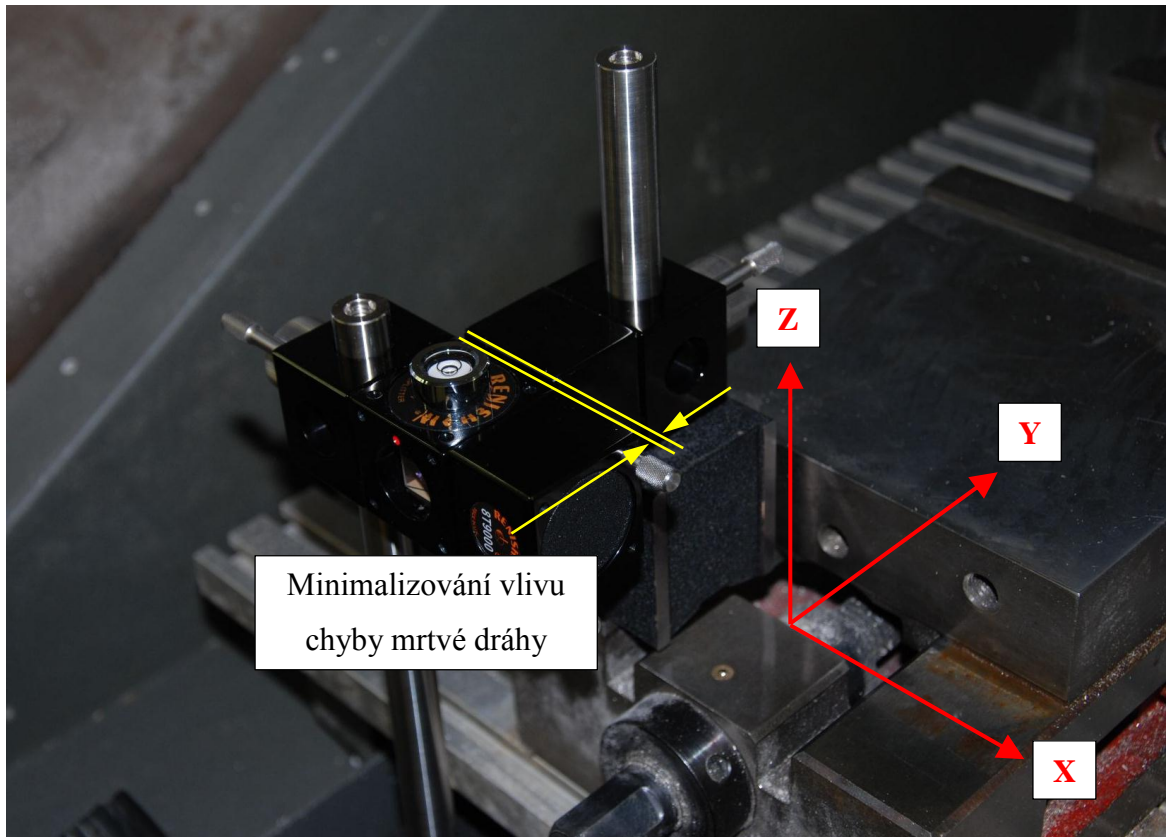


Obr. 34. Odražený paprsek na cloně laserové hlavičky (ilustrace). [18]

Lineární interferometr byl umístěn co nejbližěji odražeči. Tím byl minimalizován vliv chyby mrtvé dráhy. Vnější čelní plochy interferometru a odražeče byly navzájem vyrovnány.

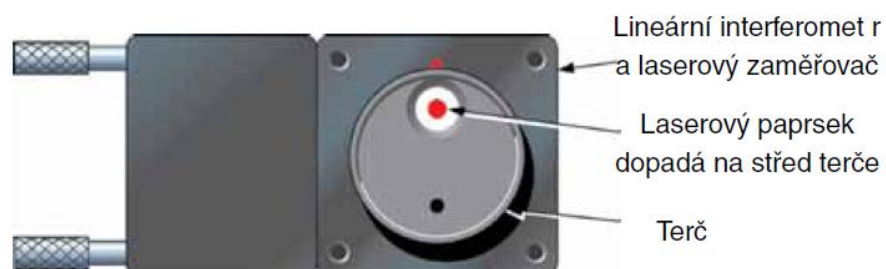


Obr. 35. Vyrovnání interferometru a odražeče (ilustrace). [18]



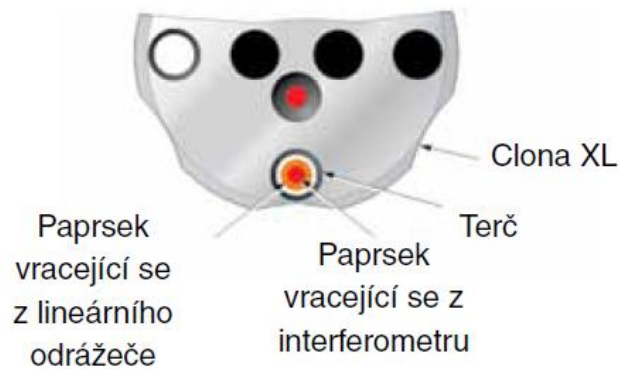
Obr. 36. Vyrovnání interferometru a odražeče na měřeném stroji.

Terč s bílou tečkou nahoře byl připevněn ke vstupnímu otvoru interferometru a interferometr byl posunut svisle a vodorovně tak, aby paprsek dopadl na terč.



Obr. 37. Lineární interferometr po vyrovnání (ilustrace). [18]

Po vyjmutí terče musí paprsek vracející se z interferometru dopadat do středu clony laseru. Pokud tomu tak není, je zapotřebí přestavení interferometru.



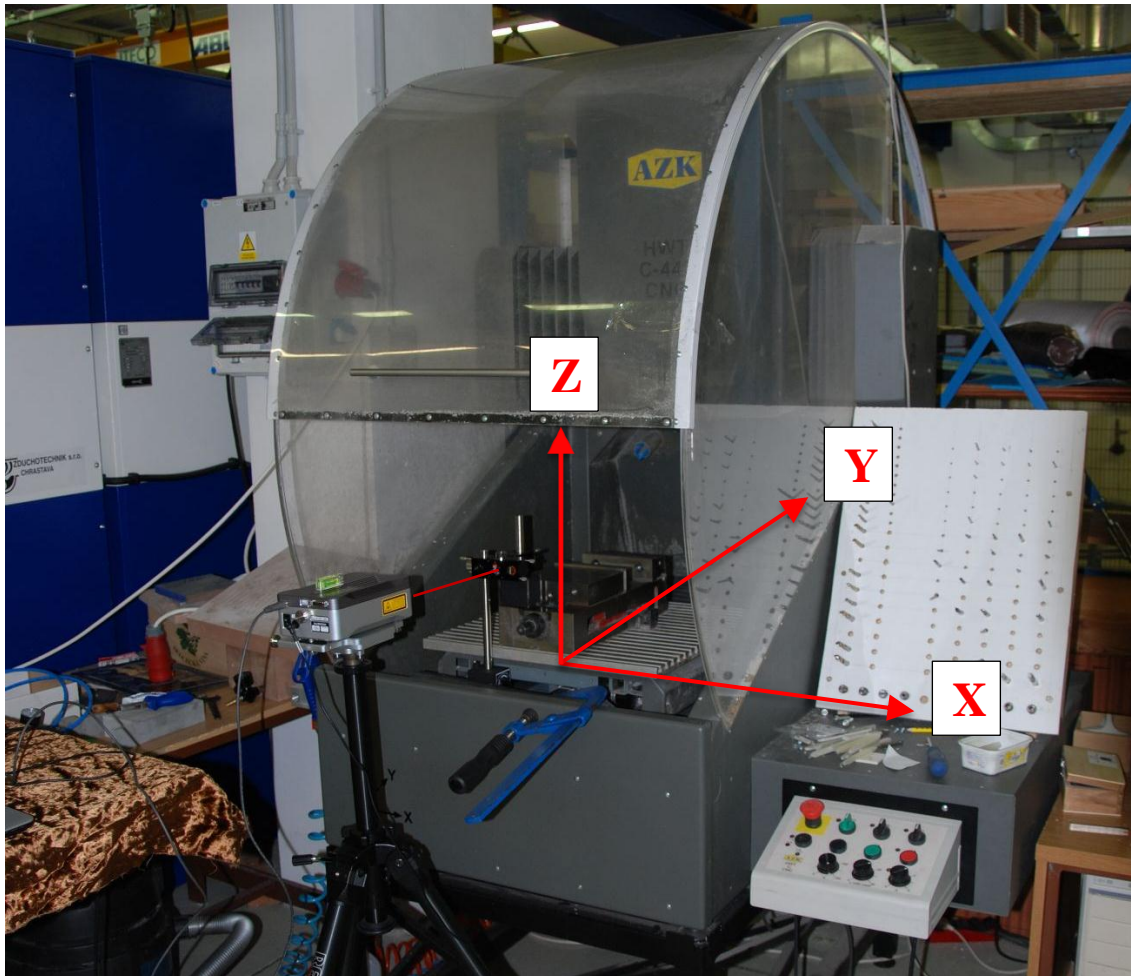
Obr. 38. Poloha paprsků na cloně laseru (ilustrace). [18]

Poloha paprsků na střed terče musí být dodržena v celé měřené dráze, proto byl pracovní stůl s upnutým odražečem přestavován v celé dráze, až byl laser seřízen tak, aby oba paprsky dopadaly na střed terče v celé ose pohybu. Potom se otočila clona laseru do její měřící polohy a byla zkontrolována síla signálu zobrazená měřícím softwarem Renishaw LaserXL Capture.



Obr. 39. Měřící poloha laserové clony (ilustrace). [18]

Před vlastním měřením byla spuštěna posuvná průhledná stěna z polymethylmetakrylátu co nejnižze pro omezení proudění vzduchu v měřeném úseku a tím pro co nejmenší změny indexu lomu, jež mají vliv na vlnovou délku laseru a nepříznivě ovlivňují přesnost měření.

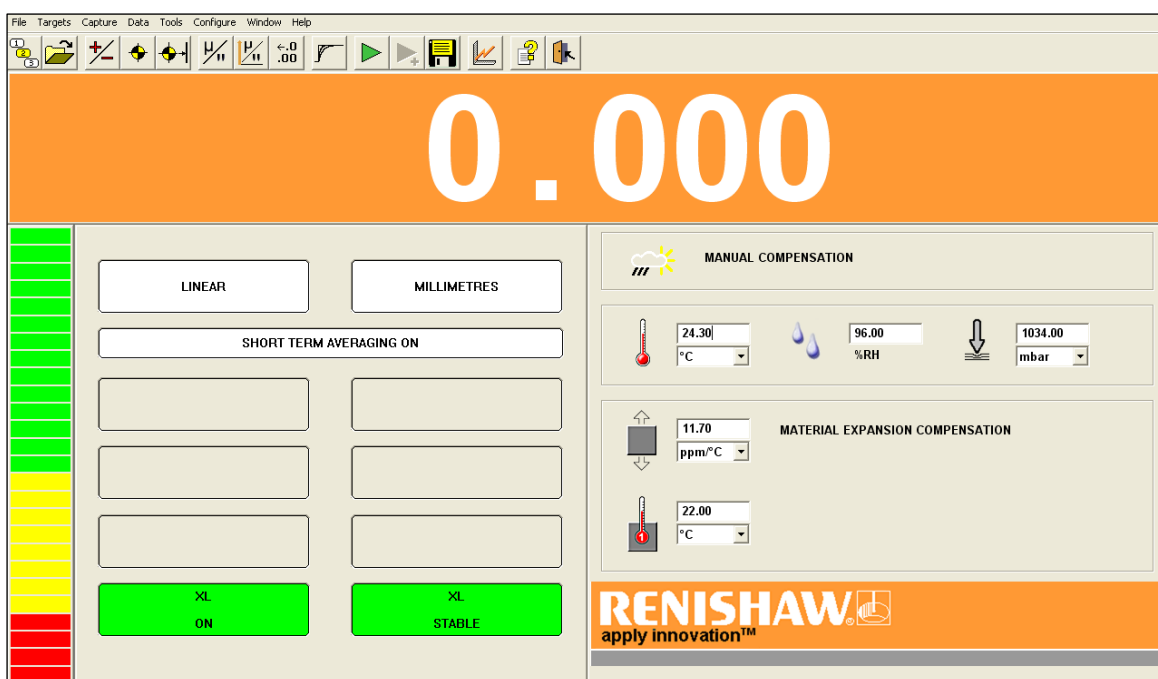


Obr. 40. Pohled na měřenou frézku s vyznačenými pohybovými osami.

5.3 Snímání dat

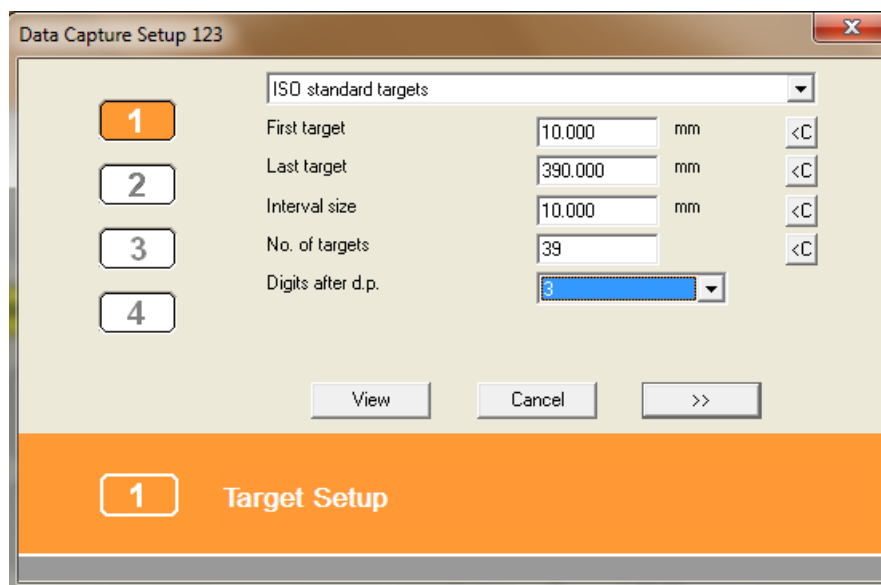
Snímání naměřených hodnot bylo provedeno pomocí softwaru Renishaw LaserXL Capture, nainstalovaném v notebooku, propojeném s laserem přes USB rozhraní. Laser bylo nutno před samotným měřením temperovat. Dokončení temperační sekvence bylo signalizováno oranžovou LED diodou na horní straně laseru.

Pracovní stůl byl přesunut do krajní pozice tak, aby byly optické prvky co nejbližší sebe z důvodu vyloučení chyby mrtvé dráhy. Numerický displej byl v této poloze vynulován.



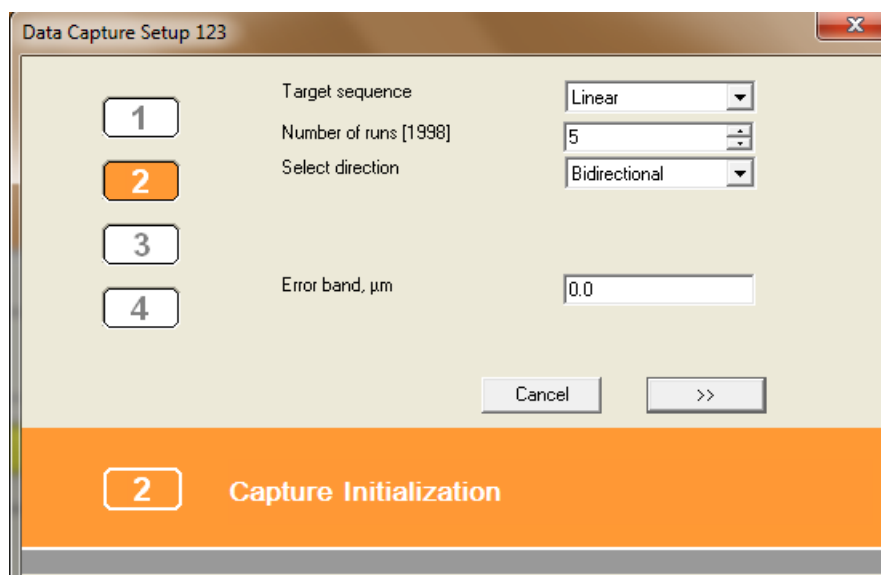
Obr. 41. Interface softwaru Renishaw Laser XL Capture.

Potom bylo provedeno přes dialogové okno nastavení terčů. Byla nastavena hodnota prvního terče, posledního terče a velikost intervalu. Software automaticky vypočítal a zobrazil počet terčů. Rozlišení měření bylo zvoleno 1 μ m.



Obr. 42. První dialogové okno nastavení terčů.

V dalším kroku byla nastavena posloupnost terčů lineární, počet běhů byl stanoven na pět a dvoustranné (bidirekcionální) nastavení polohy.



Obr. 43. Druhé dialogové okno nastavení terčů.

Do třetího okna byl vepsán typ stroje s jeho sériovým číslem, jméno osoby provádějící měření, měřená osa stroje a lokalizace umístění stroje.

1	Machine	AZK HWT C-442
2	Serial No	442P.8CNC
3	Date	10:15 Mar 01 2012
4	By	Bravenec
	Axis	Y
	Location	C107
	TITLE	

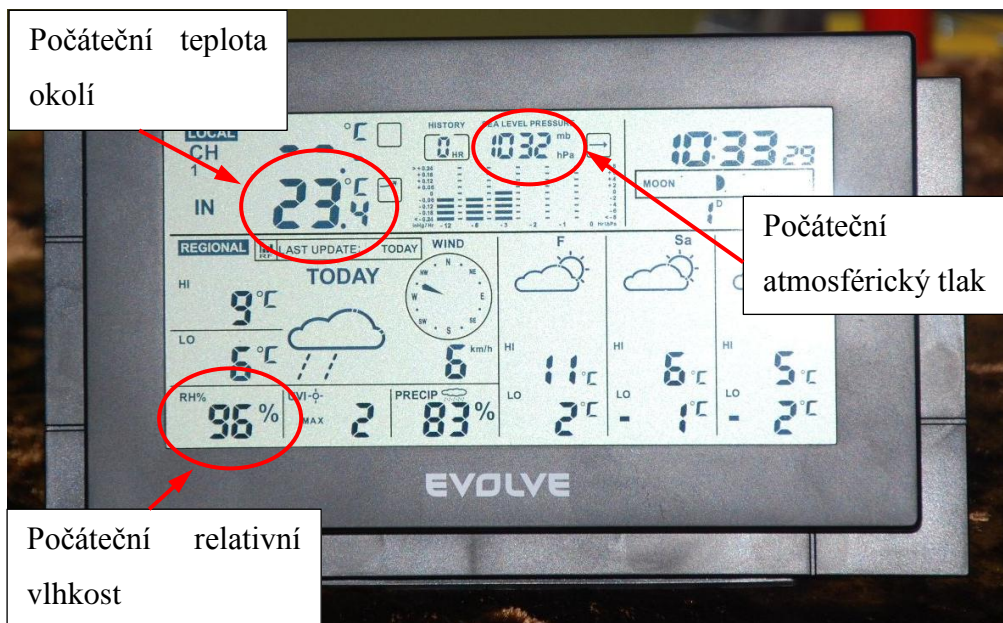
Obr. 44. Třetí dialogové okno nastavení terčů.

V posledním dialogovém okně bylo zvoleno manuální snímání dat.

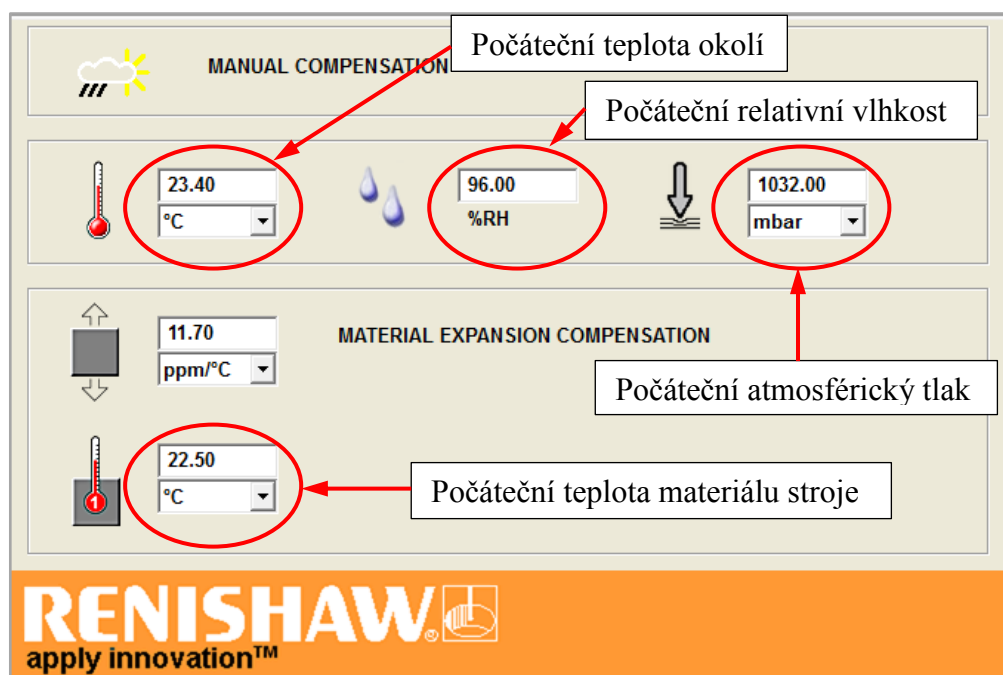
1	Automatic capture	Disabled
2	Type of capture	Position
3	Minimum period halt	2.00 secs
4	Stability of reading	0.001 mm
	Tolerance window	4.000000 mm
	Overrun step size	2.0000 mm
	Overrun action	On move

Obr. 45. Čtvrté dialogové okno nastavení terčů.

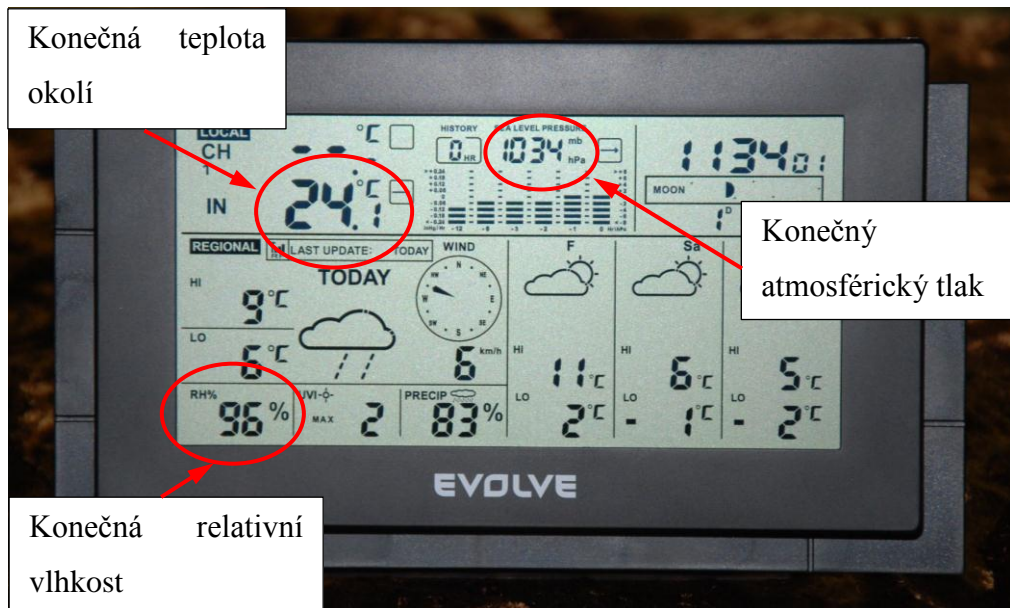
Při měření byla použita manuální kompenzace vlivu prostředí. Pomocí přenosné meteorologické stanice EVOLVE byla měřena teplota okolí, relativní vlhkost a atmosférický tlak v místě měření. Naměřené údaje byly vloženy do dialogového okna manuální kompenzace a během měření průběžně aktualizovány. Teplota materiálu měřeného stroje byla měřena digitálním teploměrem s odporovým snímačem.



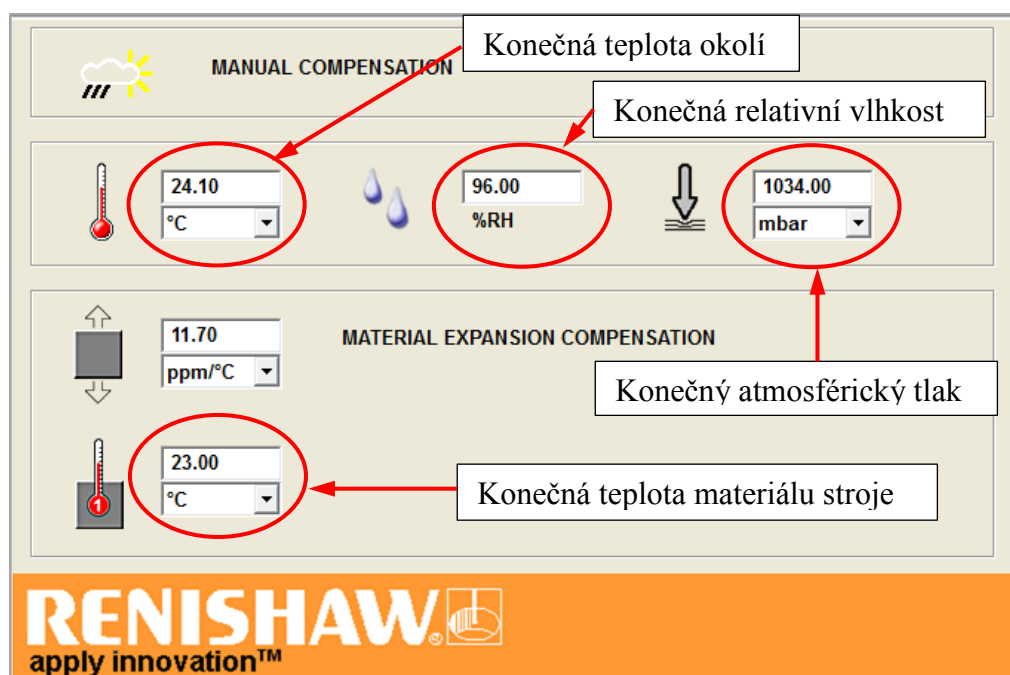
Obr. 46. Počáteční hodnoty pro manuální kompenzaci vlivu prostředí (osa Y).



Obr. 47. Dialogové okno počátečních hodnot pro manuální kompenzaci (osa Y).



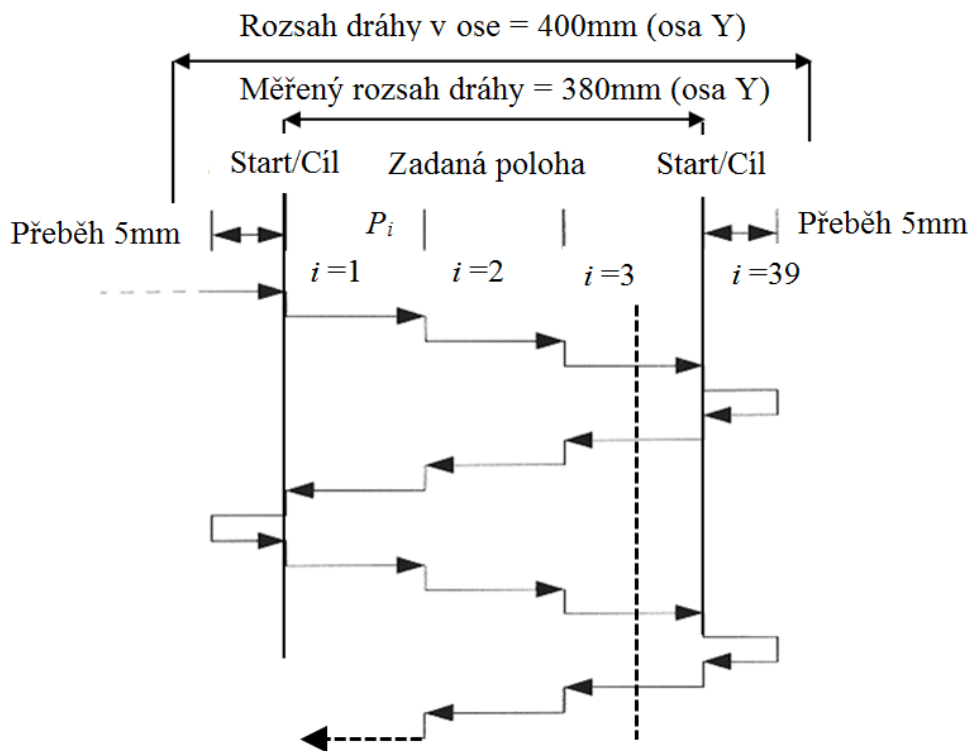
Obr. 48. Konečné hodnoty pro manuální kompenzaci vlivu prostředí (osa Y).



Obr. 49. Dialogové okno konečných hodnot pro manuální kompenzaci (osa Y).

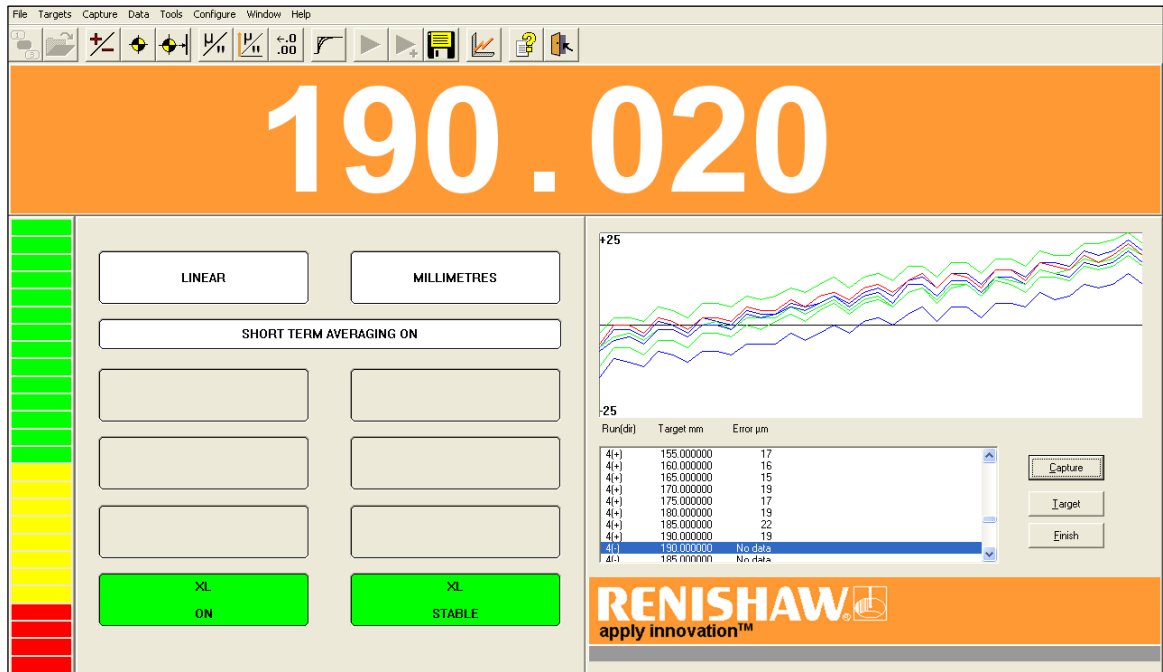
Dle normy ISO 230-2 musí být v osách stroje s rozsahem dráhy do 2000mm zvoleno minimálně pět poloh na metr a minimálně pět poloh celkově. Měření musí být provedeno ve všech zadaných polohách při použití běžného zkušebního cyklu (lineární bidirekcionální pětichodý cyklus). Do každé zadané polohy musí být v obou směrech pohybu najeto pětkrát. Poloha pro změnu pohybu by měla být zvolena tak, aby bylo možné normální chování stroje (aby bylo dosaženo dohodnuté rychlosti posuvu). [5]

Jako první byla změřena osa Y, jejíž rozsah je 400mm. Interval měření byl určen 10mm, hodnota přeběhu byla v obou směrech 5mm, nebylo tedy proměřeno pouze přibližně 10mm v obou krajních polohách pojezdu této osy. Poloha neměřených os byla $X=300\text{mm}$ a $Z=200\text{mm}$.



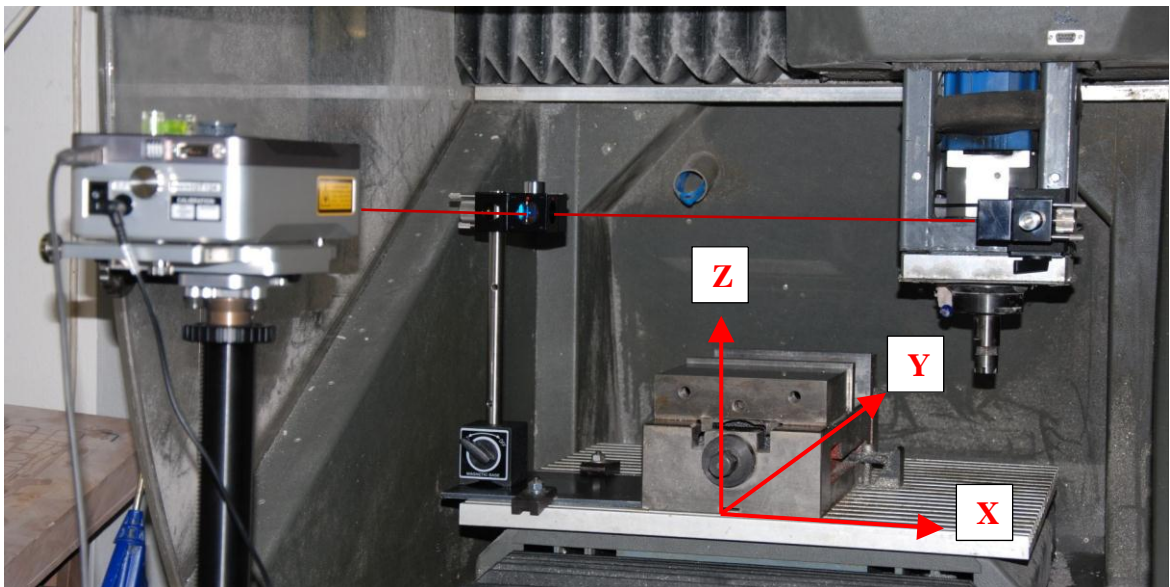
Obr. 50. Lineární bidirekcionální cyklus. [23]

Ovládání stroje bylo zvoleno manuální, v interface řídicího systému COMETS nainstalovaném na PC v příslušenství stroje byl navolen inkrement 10mm a příslušnými tlačítky cursorových šipek na klávesnici byl pojezd osy ovládán. Po najetí do polohy a ustálení naměřené hodnoty byl údaj potvrzen tlačítkem *Capture* v interface softwaru Renishaw LaserXL Capture.



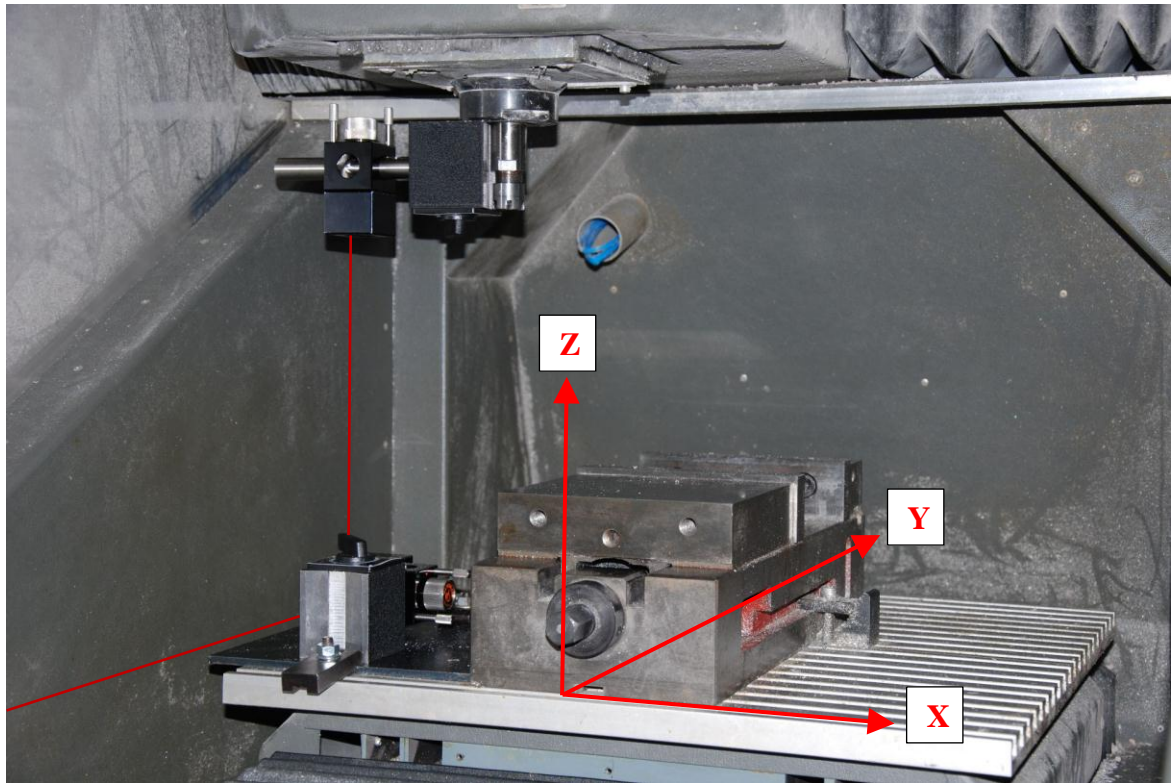
Obr. 51. Okno snímání dat.

Jako další byla změřena osa X. Jelikož je její rozsah identický s prvně měřenou osou Y, byly stejné také intervaly měření a hodnoty přeběhu. Poloha neměřených os byla $Y=200\text{mm}$ a $Z=0\text{mm}$. Optické prvky musely být přestavěny a veškeré vyrovnání a nastavení uděláno znovu.



Obr. 52. Nastavení optických prvků při měření osy X.

Poslední měřenou osou byla vertikální osa Z, jejíž rozsah je 200mm. Interval měření byl úměrně zmenšen na 5mm, hodnoty přeběhu zůstaly 5mm. Poloha neměřených os byla $X=100\text{mm}$ a $Y=100\text{mm}$. Optické prvky musely být opět přestavěny a vyrovnány.



Obr. 53. Nastavení optických prvků při měření osy Z.

6 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

6.1 Výpočet parametrů polohování dle normy ČSN ISO 230-2:2006

Pro stroje s rozsahem lineárních os do 2000mm jsou dle normy ČSN ISO 230-2:2006 prezentovány tyto hodnoty: [5]

- Dvousměrná přesnost nastavení polohy v ose (Rov. 2.21)

$$A = \max.[\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min.[\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow]$$

$$A_{osaY} = 51,767 - (-3,699) = 55,466 \mu\text{m}$$

$$A_{osaX} = 2,647 - (-37,004) = 39,651 \mu\text{m}$$

$$A_{osaZ} = 27,272 - (-16,725) = 43,996 \mu\text{m}$$

- Jednosměrná přesnost nastavení polohy v ose ve směru \uparrow (Rov. 2.19)

$$A \uparrow = \max.[\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow] - \min.[\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow]$$

$$A \uparrow_{osaY} = 51,453 - (-3,699) = 55,152 \mu\text{m}$$

$$A \uparrow_{osaX} = 2,647 - (-32,233) = 34,880 \mu\text{m}$$

$$A \uparrow_{osaZ} = 27,272 - (-16,725) = 43,996 \mu\text{m}$$

- Jednosměrná přesnost nastavení polohy v ose ve směru \downarrow (Rov. 2.20)

$$A \downarrow = \max.[\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min.[\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow]$$

$$A \downarrow_{osaY} = 51,767 - (-3,473) = 55,240 \mu\text{m}$$

$$A \downarrow_{osaX} = 0,747 - (-37,004) = 37,750 \mu\text{m}$$

$$A \downarrow_{osaZ} = 26,973 - (-14,894) = 41,867 \mu\text{m}$$

- Dvousměrná systematická polohová úchylka v ose (Rov. 2.17)

$$E = \max. [\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow]$$

$$E_{osaY} = 40,400 - (-1,800) = 42,200 \mu\text{m}$$

$$E_{osaX} = -1,200 - (-31,600) = 30,400 \mu\text{m}$$

$$E_{osaZ} = 20,400 - (-8,800) = 29,200 \mu\text{m}$$

- Jednosměrná systematická polohová úchylka v ose ve směru \uparrow (Rov. 2.15)

$$E \uparrow = \max. [\bar{x}_i \uparrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow]$$

$$E \uparrow_{osaY} = 38,600 - (-1,200) = 39,800 \mu\text{m}$$

$$E \uparrow_{osaX} = -1,200 - (-28,600) = 27,400 \mu\text{m}$$

$$E \uparrow_{osaZ} = 18,600 - (-8,800) = 27,400 \mu\text{m}$$

- Jednosměrná systematická polohová úchylka v ose ve směru \downarrow (Rov. 2.16)

$$E \downarrow = \max. [\bar{x}_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \downarrow]$$

$$E \downarrow_{osaY} = 40,400 - (-1,800) = 42,200 \mu\text{m}$$

$$E \downarrow_{osaX} = -2,600 - (-31,600) = 29,000 \mu\text{m}$$

$$E \downarrow_{osaZ} = 20,400 - (-7,600) = 28,000 \mu\text{m}$$

- Rozsah průměrné dvousměrné polohové úchylky v ose (Rov. 2.18)

$$M = \max. [\bar{x}_i] - \min. [\bar{x}_i]$$

$$M_{osaY} = 39,500 - (-1,500) = 41,000 \mu\text{m}$$

$$M_{osaX} = -1,900 - (-30,100) = 28,200 \mu\text{m}$$

$$M_{osaZ} = 19,500 - (-8,200) = 27,700 \mu\text{m}$$

- Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose (Rov. 2.14)

$$R = \max. [R_i]$$

$$R_{osaY} = 26,547 \mu\text{m} \quad (P_i = 36)$$

$$R_{osaX} = 15,018 \mu\text{m} \quad (P_i = 35)$$

$$R_{osaZ} = 19,473 \mu\text{m} \quad (P_i = 32)$$

- Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose ve směru \uparrow (Rov. 2.11)

$$R \uparrow = \max. [R_i \uparrow]$$

$$R \uparrow_{osaY} = 25,706 \mu\text{m} \quad (P_i = 34)$$

$$R \uparrow_{osaX} = 10,354 \mu\text{m} \quad (P_i = 35)$$

$$R \uparrow_{osaZ} = 19,473 \mu\text{m} \quad (P_i = 32)$$

- Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose ve směru \downarrow (Rov. 2.12)

$$R \downarrow = \max. [R_i \downarrow]$$

$$R \downarrow_{osaY} = 22,733 \mu\text{m} \quad (P_i = 34)$$

$$R \downarrow_{osaX} = 13,682 \mu\text{m} \quad (P_i = 35)$$

$$R \downarrow_{osaZ} = 15,900 \mu\text{m} \quad (P_i = 30)$$

- Necitlivost v ose (Rov. 2.5)

$$B = \max | B_i |$$

$$B_{osaY} = 4,800 \mu\text{m} \quad (P_i = 38)$$

$$B_{osaX} = 3,600 \mu\text{m} \quad (P_i = 17)$$

$$B_{osaZ} = 2,600 \mu\text{m} \quad (P_i = 9)$$

- Průměrná necitlivost v ose (Rov. 2.6)

$$\bar{B} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n B_i$$

$$\bar{B}_{osaY} = (1/39) \cdot (-31,600) = -0,810 \mu\text{m}$$

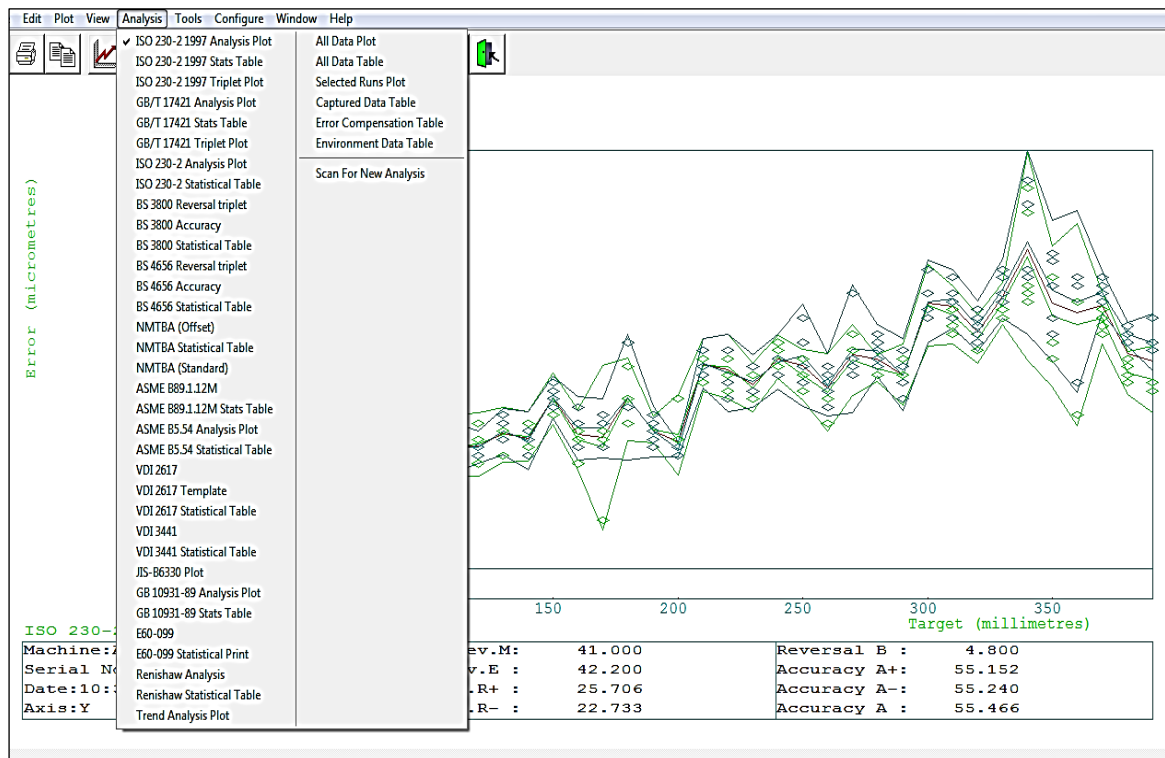
$$\bar{B}_{osaX} = (1/39) \cdot (99,600) = 2,554 \mu\text{m}$$

$$\bar{B}_{osaZ} = (1/38) \cdot (-64,200) = -1,689 \mu\text{m}$$

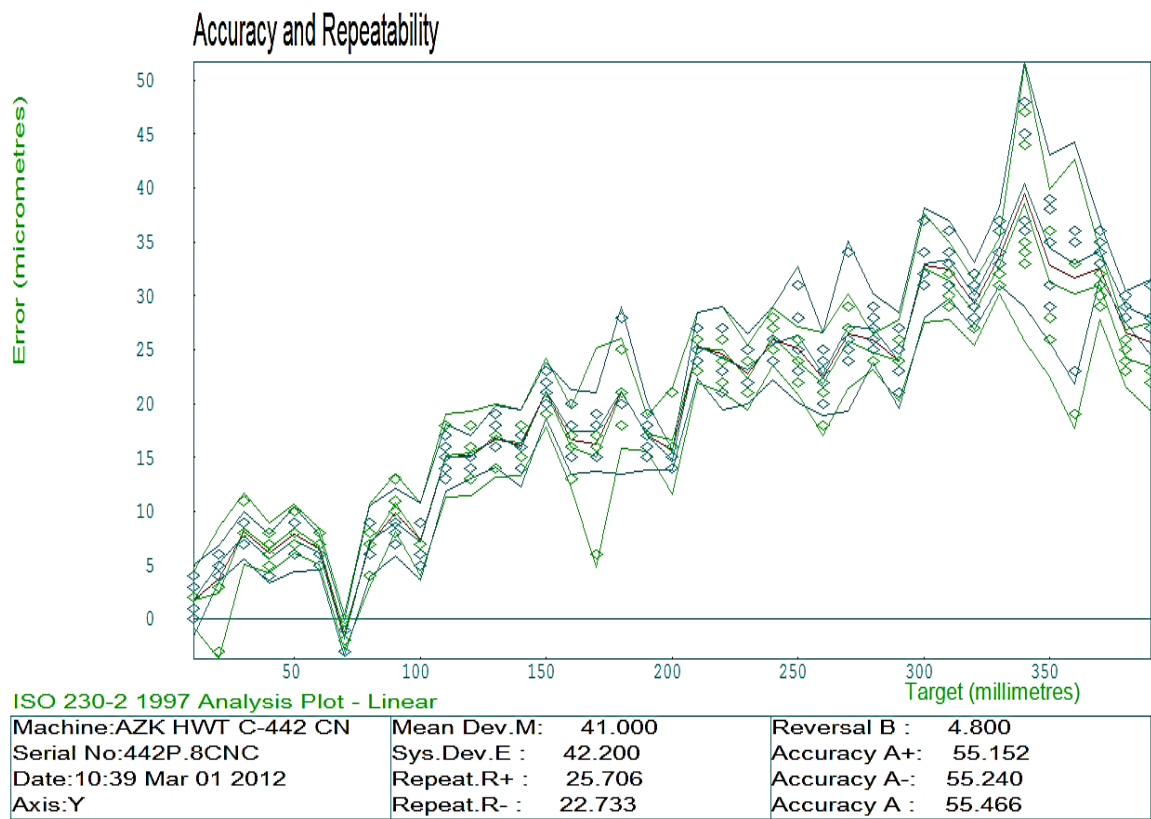
Všechny vypočítané výsledné hodnoty jsou uvedeny na tři desetinná místa pro porovnání s hodnotami poskytnuté analýzou softwaru Renishaw LaserXL Capture.

V softwaru Renishaw LaserXL Capture lze vyvolat menu s nabídkou analýzy naměřených údajů dle různých norem. Byla vybrána analýza podle normy ISO 230-2:1997, jejíž vyhodnocení je stejné s novelizovanou normou ISO 230-2:2006.

Touto analýzou jsou na obrázcích (Obr. 55, 57, 59) vyhodnoceny grafy polohování jednotlivých os a na obrázcích (Obr. 56, 58, 60) je podle této analýzy statistické vyhodnocení parametrů polohování.



Obr. 54. Menu analýzy softwaru Renishaw LaserXL Capture.

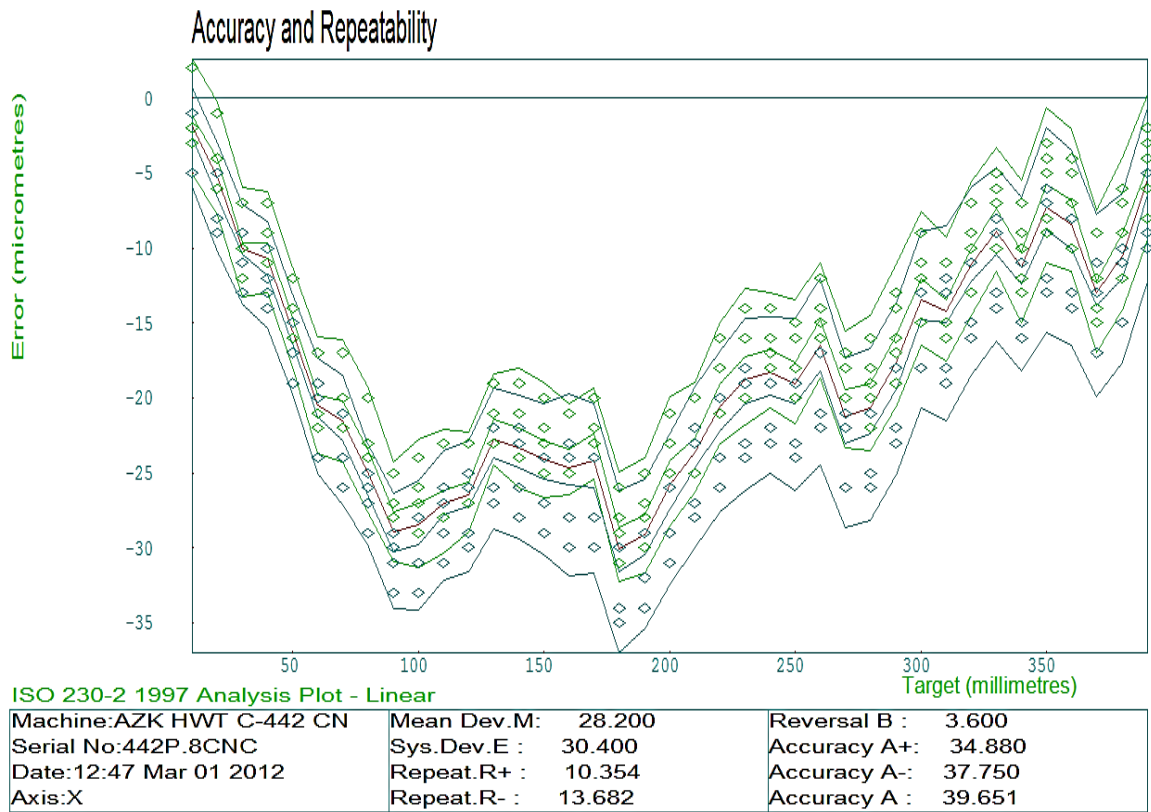


Obr. 55. Graf polohování osy Y podle normy ISO 230-2.

---Statistics---

Axis Deviation (micrometres)	Unidirectional (-)	Unidirectional (+)	Bidirectional
Reversal B	Not applicable	Not applicable	4.800 (at i=38)
Mean Reversal \bar{B}	Not applicable	Not applicable	-0.810
Mean Dev.M	Not applicable	Not applicable	41.000
Sys.Dev.E	42.200	39.800	42.200
Repeatability R	22.733 (at i=34)	25.706 (at i=34)	26.547 (at i=36)
Accuracy A	55.240	55.152	55.466

Obr. 56. Vyhodnocení polohování osy Y podle normy ISO 230-2.

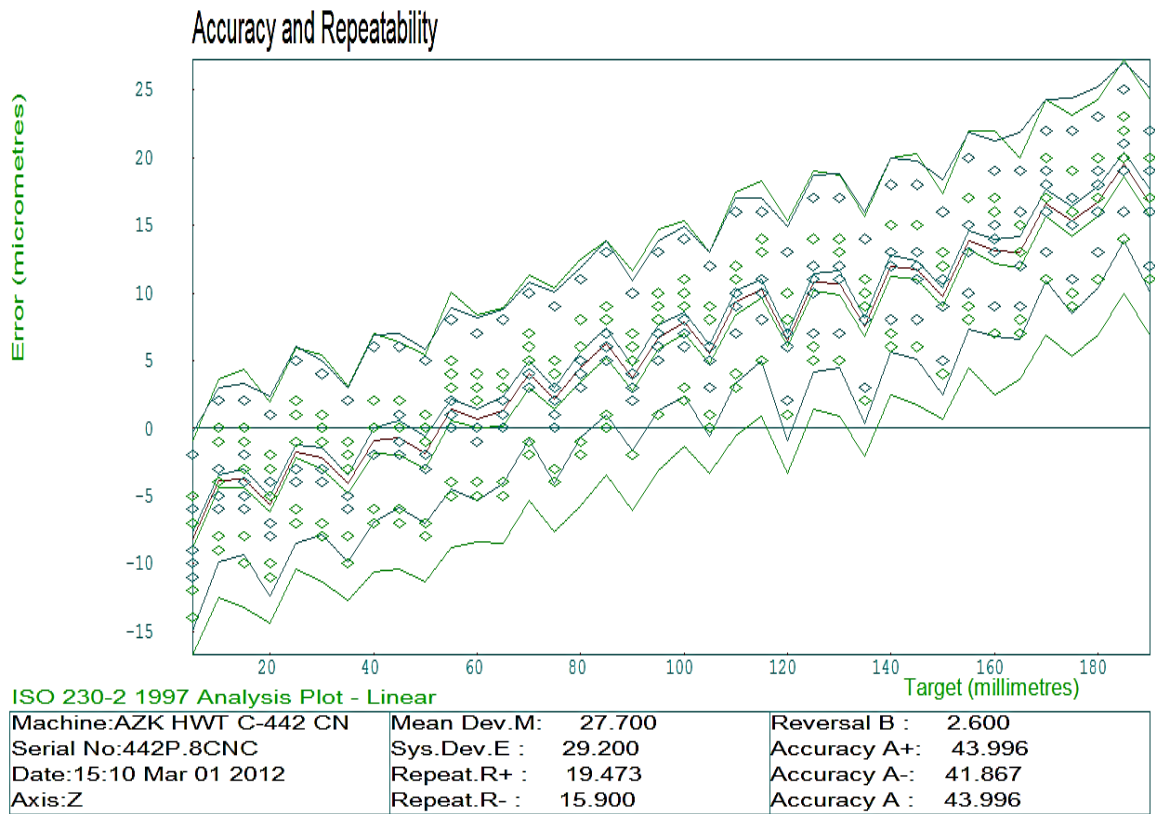


Obr. 57. Graf polohování osy X podle normy ISO 230-2.

--Statistics--

Axis Deviation (micrometres)	Unidirectional (-)	Unidirectional (+)	Bidirectional
Reversal B	Not applicable	Not applicable	3.600 (at i=17)
Mean Reversal \bar{B}	Not applicable	Not applicable	2.554
Mean Dev. M	Not applicable	Not applicable	28.200
Sys.Dev. E	29.000	27.400	30.400
Repeatability R	13.682 (at i=35)	10.354 (at i=35)	15.018 (at i=35)
Accuracy A	37.750	34.880	39.651

Obr. 58. Vyhodnocení polohování osy X podle normy ISO 230-2.



Obr. 59. Graf polohování osy Z podle normy ISO 230-2.

---Statistics-----

Axis Deviation (micrometres)	Unidirectional (-)	Unidirectional (+)	Bidirectional
Reversal B	Not applicable	Not applicable	2.600 (at i= 9)
Mean Reversal \bar{B}	Not applicable	Not applicable	-1.689
Mean Dev.M	Not applicable	Not applicable	27.700
Sys.Dev.E	28.000	27.400	29.200
Repeatability R	15.900 (at i=30)	19.473 (at i=32)	19.473 (at i=32)
Accuracy A	41.867	43.996	43.996

Obr. 60. Vyhodnocení polohování osy Z podle normy ISO 230-2.

6.1.1 Výpočet odhadů nejistot měření lineárního polohování

Faktory přispívající k nejistotě měření jsou měřicí zařízení, přesazení měřicího zařízení k ose zkoušeného stroje, nejistota vlivem kompenzace teploty stroje vlivem měření při teplotách jiných než 20°C a kolísání chyby způsobené environmentem (E_{VE}). [5]

- Nejistota měření vlivem měřicího zařízení

$$U_{DEVICE} = 0,6 \cdot R_{DEVICE} \cdot L \quad (6.1)$$

R_{DEVICE} = rozsah chyby určený výrobcem zařízení [$\mu\text{m}/\text{m}$]

L = měřená délka [m]

$$U_{DEVICE,osaY} = 0,6 \cdot 0,5 \cdot 0,380 = 0,114\mu\text{m}$$

$$U_{DEVICE,osaX} = 0,6 \cdot 0,5 \cdot 0,380 = 0,114\mu\text{m}$$

$$U_{DEVICE,osaZ} = 0,6 \cdot 0,5 \cdot 0,180 = 0,054\mu\text{m}$$

- Nejistota měření vlivem přesazení měřicího zařízení k ose zkoušeného stroje

$$U_{MISALIGNMENT} = 0,3 \cdot \frac{R_{MISALIGNMENT}^2}{L} \quad (6.2)$$

$R_{MISALIGNMENT}$ = přesazení měřicího zařízení [mm]

$$U_{MISALIGNMENT,osaY} = 0,3 \cdot \frac{2^2}{0,380} = 3,157\mu\text{m}$$

$$U_{MISALIGNMENT,osaX} = 0,3 \cdot \frac{2^2}{0,380} = 3,157\mu\text{m}$$

$$U_{MISALIGNMENT,osaZ} = 0,3 \cdot \frac{1^2}{0,180} = 1,667\mu\text{m}$$

- Nejistota měření při měření teploty stroje

$$U_{M,MACHINE\ TOOL} = 0,6 \cdot \alpha \cdot L \cdot R(\theta) \quad (6.3)$$

α = koeficient roztažnosti stroje [$\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$]

$R(\theta)$ = možný rozsah teploty stroje vlivem nejistoty měření [$^\circ\text{C}$], běžně užívané snímače teploty mají rozsah odchylky cca $0,7^\circ\text{C}$, což odpovídá vyjádření o $0,35^\circ\text{C}$

$$U_{M,MACHINE\ TOOL,osaY} = 0,6 \cdot 11,7 \cdot 0,380 \cdot 0,35 = 0,934\mu\text{m}$$

$$U_{M,MACHINE\ TOOL,osaX} = 0,6 \cdot 11,7 \cdot 0,380 \cdot 0,35 = 0,934\mu\text{m}$$

$$U_{M,MACHINE\ TOOL,osaZ} = 0,6 \cdot 11,7 \cdot 0,180 \cdot 0,35 = 0,442\mu\text{m}$$

- Nejistota měření při měření teploty měřicího zařízení

$$U_{M,DEVICE} = 0,6 \cdot \alpha \cdot L \cdot R(\theta) \quad (6.4)$$

α = koeficient roztažnosti měřicího zařízení [$\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$]

$R(\theta)$ = možný rozsah teploty měřicího zařízení vlivem nejistoty měření [$^\circ\text{C}$]

$$U_{M,DEVICE,osaY,X,Z} = 0\mu\text{m} \text{ (použita manuální kompenzace měřicího zařízení)}$$

- Nejistota měření vlivem koeficientu teplotní roztažnosti stroje

$$U_{E,MACHINE\ TOOL} = 0,6 \cdot \Delta T \cdot L \cdot R(\alpha) \quad (6.5)$$

ΔT = max. rozdíl teploty stroje na 20°C [$^\circ\text{C}$]

$R(\alpha)$ = rozsah chyby koeficientu roztažnosti stroje [$\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$], jeho typický rozsah je $2 \mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$, což odpovídá vyjádření o $1 \mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$

$$U_{E,MACHINE\ TOOL,osaY} = 0,6 \cdot 3 \cdot 0,380 \cdot 1 = 0,684\mu m$$

$$U_{E,MACHINE\ TOOL,osaX} = 0,6 \cdot 3 \cdot 0,380 \cdot 1 = 0,684\mu m$$

$$U_{E,MACHINE\ TOOL,osaZ} = 0,6 \cdot 3 \cdot 0,180 \cdot 1 = 0,324\mu m$$

- Nejistota měření vlivem koeficientu teplotní roztažnosti měřícího zařízení

$$U_{E,DEVICE} = 0,6 \cdot \Delta T \cdot L \cdot R(\alpha) \quad (6.6)$$

ΔT = rozdíl teploty měřícího zařízení na 20°C [°C]

$R(\alpha)$ = rozsah chyby koeficientu roztažnosti měřícího zařízení [$\mu m/(m \cdot ^\circ C)$]

$$U_{E,DEVICE,osaY,X,Z} = 0\mu m \text{ (použita manuální kompenzace měřícího zařízení)}$$

- Nejistota měření vlivem kolísání environmentu

$$U_{EVE} = 0,6 \cdot E_{VE} \quad (6.7)$$

E_{VE} = rozsah zjištěný při zkoušce driftu (tepelné dilatace) [μm], před zahájením měření délky se pohybuje osou stroje do extrémní polohy (nejdelší vzdálenost). Během času, který je přibližně zapotřebí pro měření délky, se zaznamená aktuální hodnota odečtená na měřícím zařízení.

$$U_{EVE,osaY} = 0,6 \cdot 2 = 1,2\mu m$$

$$U_{EVE,osaX} = 0,6 \cdot 2 = 1,2\mu m$$

$$U_{EVE,osaZ} = 0,6 \cdot 1 = 0,6\mu m$$

6.1.2 Výpočet odhadů nejistot parametrů lineárního polohování

Jsou brány v úvahu následující faktory k nejistotě měření: měřící zařízení, přesazení zařízení vzhledem ke zkoušené ose stroje, teplota měření pro stroj a měřící zařízení, koeficient teplotní roztažnosti stroje a měřícího zařízení, kolísání chyby environmentu (E_{VE}). [5]

- Nejistota měření jednosměrné opakovatelnosti

$$U(R \uparrow, R \downarrow) = 2 \cdot U_{EVE} \quad (6.8)$$

$$U(R \uparrow, R \downarrow)_{osaY} = 2 \cdot 1,2 = 2,4 \mu m$$

$$U(R \uparrow, R \downarrow)_{osaX} = 2 \cdot 1,2 = 2,4 \mu m$$

$$U(R \uparrow, R \downarrow)_{osaZ} = 2 \cdot 0,6 = 1,2 \mu m$$

- Nejistota měření necitlivosti

$$U(B) = 0,9 \cdot U_{EVE} \quad (6.9)$$

$$U(B)_{osaY} = 0,9 \cdot 1,2 = 1,08 \mu m$$

$$U(B)_{osaX} = 0,9 \cdot 1,2 = 1,08 \mu m$$

$$U(B)_{osaZ} = 0,9 \cdot 0,6 = 0,54 \mu m$$

- Nejistota měření dvousměrné opakovatelnosti

$$U(R) = 2,2 \cdot U_{EVE} \quad (6.10)$$

$$U(R)_{osaY} = 2,2 \cdot 1,2 = 2,64 \mu m$$

$$U(R)_{osaX} = 2,2 \cdot 1,2 = 2,64 \mu m$$

$$U(R)_{osaZ} = 2,2 \cdot 0,6 = 1,32 \mu m$$

- Nejistota měření systematických úchylek

$$U(E, E \uparrow, E \downarrow) = \sqrt{U_{DEV}^2 + U_{MIS}^2 + U_{M,MACH}^2 + U_{M,DEV}^2 + U_{E,MACH}^2 + U_{E,DEV}^2 + \frac{1}{5} U_{EVE}^2} \quad (6.11)$$

$$U(E, E \uparrow, E \downarrow)_{osaY} = \sqrt{0,114^2 + 3,157^2 + 0,934^2 + 0,684^2 + \frac{1}{5} 1,2^2} = 3,407 \mu m$$

$$U(E, E \uparrow, E \downarrow)_{osaX} = \sqrt{0,114^2 + 3,157^2 + 0,934^2 + 0,684^2 + \frac{1}{5} 1,2^2} = 3,407 \mu m$$

$$U(E, E \uparrow, E \downarrow)_{osaZ} = \sqrt{0,054^2 + 1,667^2 + 0,442^2 + 0,324^2 + \frac{1}{5} 0,6^2} = 1,776 \mu m$$

- Nejistota měření průměrné polohové úchylky

$$U(M) = \sqrt{U_{DEV}^2 + U_{MIS}^2 + U_{M,MACH}^2 + U_{M,DEV}^2 + U_{E,MACH}^2 + U_{E,DEV}^2 + \frac{1}{10} U_{EVE}^2} \quad (6.12)$$

$$U(M)_{osaY} = \sqrt{0,114^2 + 3,157^2 + 0,934^2 + 0,684^2 + \frac{1}{10} 1,2^2} = 3,386 \mu m$$

$$U(M)_{osaX} = \sqrt{0,114^2 + 3,157^2 + 0,934^2 + 0,684^2 + \frac{1}{10} 1,2^2} = 3,386 \mu m$$

$$U(M)_{osaZ} = \sqrt{0,054^2 + 1,667^2 + 0,442^2 + 0,324^2 + \frac{1}{10} 0,6^2} = 1,766 \mu m$$

- Nejistota měření přesnosti polohování

$$U(A, A \uparrow, A \downarrow) = \sqrt{U(E)^2 + U(R \uparrow, R \downarrow)^2} \quad (6.13)$$

$$U(A, A \uparrow, A \downarrow)_{osaY} = \sqrt{3,407^2 + 2,4^2} = 4,167 \mu m$$

$$U(A, A \uparrow, A \downarrow)_{osaX} = \sqrt{3,407^2 + 2,4^2} = 4,167 \mu m$$

$$U(A, A \uparrow, A \downarrow)_{osaZ} = \sqrt{1,776^2 + 1,2^2} = 2,143 \mu m$$

Tab. 2. Odhad nejistoty měření polohování osy Y.

Přispívající faktory	Parametr	Nejistota [μm]	Rovnice
Měřicí zařízení			
měřená délka	380mm		
rozsah chyby	0,5 $\mu\text{m}/\text{m}$		
U(DEVICE)		0,114	(6.1)
Vyrovnání			
vyrovnání paprsku			
předpokládané vyrovnání	2mm		
měřená délka	380mm		
U(MISALIGNMENT)		3,157	(6.2)
Kompenzace teploty obrobku			
měřená délka	380mm		
koefficient teplotní roztažnosti	11,7 $\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$		
rozdíl na 20 $^\circ\text{C}$, maximální	3 $^\circ\text{C}$		
měření teploty			
maximální úchylka	0,7 $^\circ\text{C}$		
U(M,MACHINE TOOL)		0,934	(6.3)
U(M,DEVICE)	nula, manuální kompenzace		
nejistota koeficientu roztažnosti	2 $\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$		
U(E,MACHINE TOOL)		0,684	(6.5)
U(E,DEVICE)	nula, manuální kompenzace		
EVE, kolísání environmentu			
EVE	2 μm		
U(EVE)		1,200	(6.7)
U(R\uparrow,R\downarrow)		2,400	(6.8)
U(B)		1,080	(6.9)
U(R)		2,640	(6.10)
U(E,E\uparrow,E\downarrow)		3,407	(6.11)
U(M)		3,386	(6.12)
U(A,A\uparrow,A\downarrow)		4,167	(6.13)

Tab. 3. Odhad nejistoty měření polohování osy X.

Přispívající faktory	Parametr	Nejistota [μm]	Rovnice
Měřicí zařízení			
měřená délka	380mm		
rozsah chyby	0,5 $\mu\text{m}/\text{m}$		
U(DEVICE)		0,114	(6.1)
Vyrovnání			
vyrovnání paprsku			
předpokládané vyrovnání	2mm		
měřená délka	380mm		
U(MISALIGNMENT)		3,157	(6.2)
Kompenzace teploty obrobku			
měřená délka	380mm		
koefficient teplotní roztažnosti	11,7 $\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$		
rozdíl na 20 $^\circ\text{C}$, maximální	3 $^\circ\text{C}$		
měření teploty			
maximální úchylka	0,7 $^\circ\text{C}$		
U(M,MACHINE TOOL)		0,934	(6.3)
U(M,DEVICE)	nula, manuální kompenzace		
nejistota koeficientu roztažnosti	2 $\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$		
U(E,MACHINE TOOL)		0,684	(6.5)
U(E,DEVICE)	nula, manuální kompenzace		
EVE, kolísání environmentu			
EVE	2 μm		
U(EVE)		1,200	(6.7)
U(R\uparrow,R\downarrow)		2,400	(6.8)
U(B)		1,080	(6.9)
U(R)		2,640	(6.10)
U(E,E\uparrow,E\downarrow)		3,407	(6.11)
U(M)		3,386	(6.12)
U(A,A\uparrow,A\downarrow)		4,167	(6.13)

Tab. 4. Odhad nejistoty měření polohování osy Z.

Přispívající faktory	Parametr	Nejistota [μm]	Rovnice
Měřicí zařízení			
měřená délka	180mm		
rozsah chyby	0,5 $\mu\text{m}/\text{m}$		
U(DEVICE)		0,054	(6.1)
Vyrovnání			
vyrovnání paprsku			
předpokládané vyrovnání	1mm		
měřená délka	180mm		
U(MISALIGNMENT)		1,667	(6.2)
Kompenzace teploty obrobku			
měřená délka	180mm		
koefficient teplotní roztažnosti	11,7 $\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$		
rozdíl na 20 $^\circ\text{C}$, maximální	3 $^\circ\text{C}$		
měření teploty			
maximální úchylka	0,7 $^\circ\text{C}$		
U(M,MACHINE TOOL)		0,442	(6.3)
U(M,DEVICE)	nula, manuální kompenzace		
nejistota koeficientu roztažnosti	2 $\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$		
U(E,MACHINE TOOL)		0,324	(6.5)
U(E,DEVICE)	nula, manuální kompenzace		
EVE, kolísání environmentu			
EVE	1 μm		
U(EVE)		0,600	(6.7)
U(R\uparrow,R\downarrow)		1,200	(6.8)
U(B)		0,540	(6.9)
U(R)		1,320	(6.10)
U(E,E\uparrow,E\downarrow)		1,776	(6.11)
U(M)		1,766	(6.12)
U(A,A\uparrow,A\downarrow)		2,143	(6.13)

6.2 Vyhodnocení parametrů polohování dle normy ČSN ISO 230-2:2006

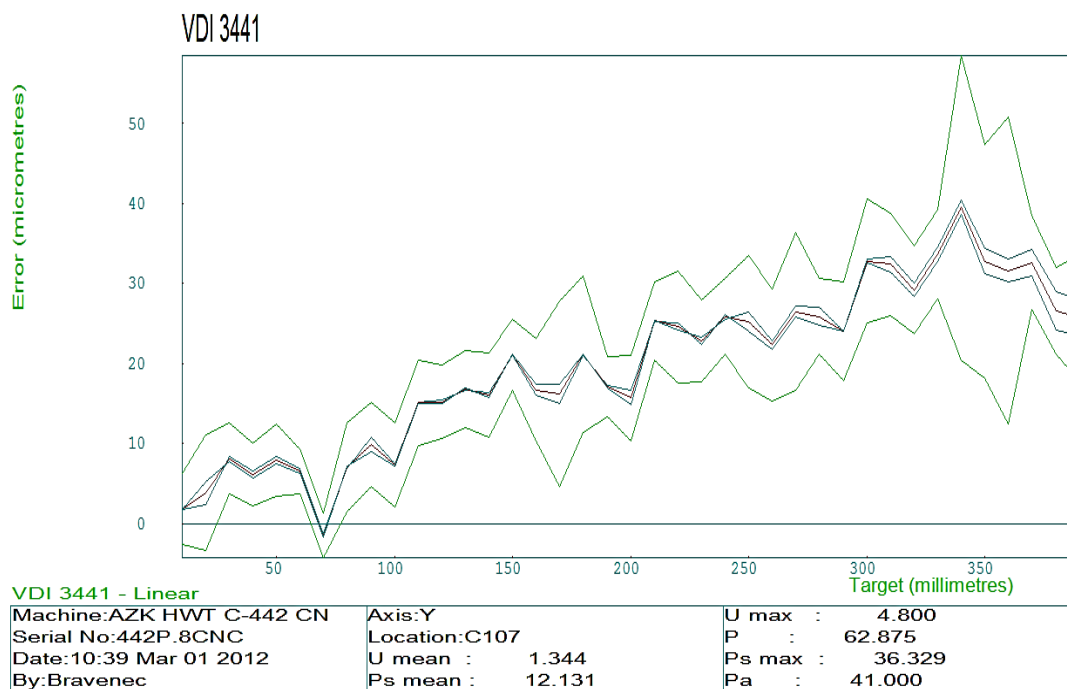
V přehledné tabulce (Tab. 5) jsou předloženy hodnoty parametrů polohování jednotlivých měřených os, dle normy ČSN ISO 230-2:2006, včetně jejich odhadů nejistot. Jelikož rozlišení laserinterferometru bylo při měření nastaveno na 1 μ m, jsou na tyto jednotky zaokrouhleny i prezentované výsledky.

Tab. 5. Parametry polohování dle ČSN ISO 230-2:2006 včetně odhadu nejistot.

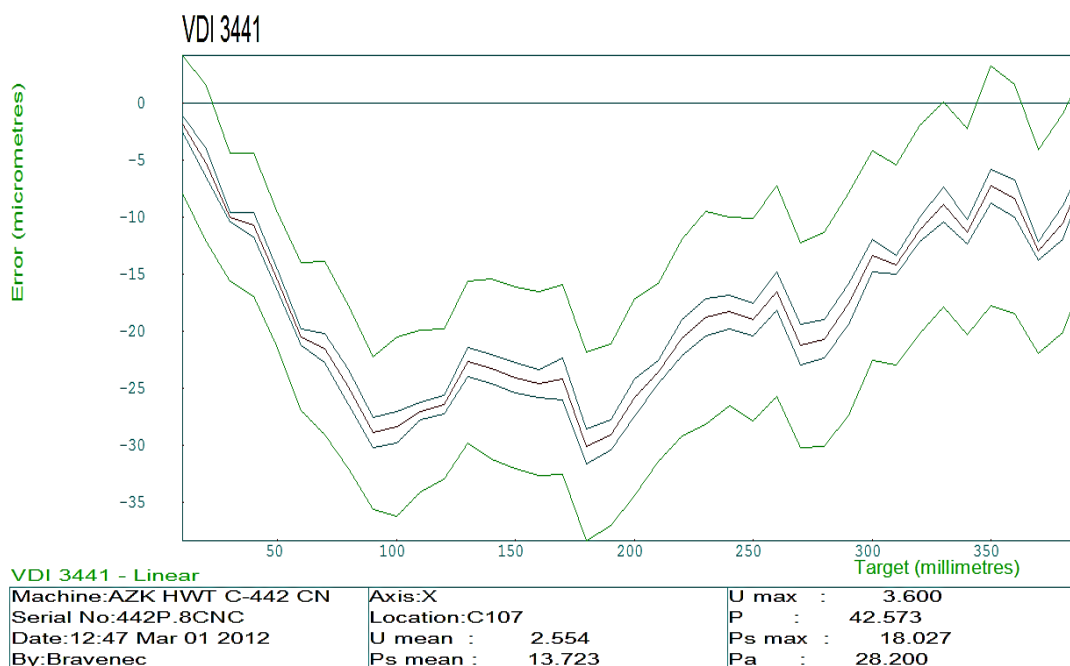
ISO 230-2:2006	Rovnice	Osa Y [μ m]	Osa X [μ m]	Osa Z [μ m]
A	(2.21), (6.13)	55 ± 4	40 ± 4	44 ± 2
$A \uparrow$	(2.19), (6.13)	55 ± 4	35 ± 4	44 ± 2
$A \downarrow$	(2.20), (6.13)	55 ± 4	38 ± 4	42 ± 2
E	(2.17), (6.11)	42 ± 3	30 ± 3	29 ± 2
$E \uparrow$	(2.15), (6.11)	40 ± 3	27 ± 3	27 ± 2
$E \downarrow$	(2.16), (6.11)	42 ± 3	29 ± 3	28 ± 2
M	(2.18), (6.12)	41 ± 3	28 ± 3	28 ± 2
R	(2.14), (6.10)	27 ± 3	15 ± 3	19 ± 1
$R \uparrow$	(2.11), (6.8)	26 ± 2	10 ± 2	19 ± 1
$R \downarrow$	(2.12), (6.8)	23 ± 2	14 ± 2	16 ± 1
B	(2.5), (6.9)	5 ± 1	4 ± 1	3 ± 1
\bar{B}	(2.6), (6.9)	-1 ± 1	3 ± 1	-2 ± 1

6.3 Vyhodnocení polohování podle normy VDI/DGQ 3441

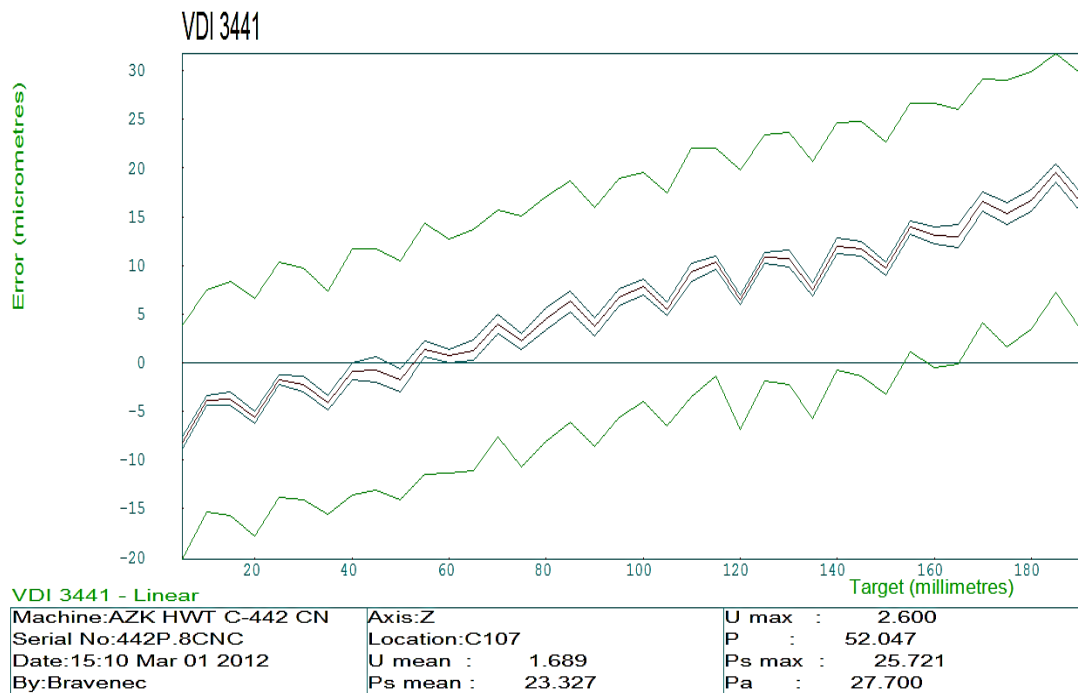
Na obrázcích (Obr. 61, 62, 63) jsou grafy polohování jednotlivých os vyhodnocené analýzou softwaru Renishaw LaserXL Capture podle normy VDI/DGQ 3441.



Obr. 61. Graf polohování osy Y podle normy VDI/DGQ 3441.



Obr. 62. Graf polohování osy X podle normy VDI/DGQ 3441.



Obr. 63. Graf polohování osy Z podle normy VDI/DGQ 3441.

6.4 Porovnání norem ČSN ISO 230-2:2006 a VDI/DGQ 3441

V tabulce (Tab. 6) jsou hodnoty parametrů polohování podle obou srovnávaných norem. Hodnoty jsou pro přesné porovnání uvedeny na stejný počet desetinných míst.

Tab. 6. Vyhodnocené parametry měření polohování.

ISO 230-2	Rovnice	Osa Y [μm]	Osa X [μm]	Osa Z [μm]	VDI/DGQ 3441	Osa Y [μm]	Osa X [μm]	Osa Z [μm]
A	(2.21)	55,466	39,651	43,996	P	62,875	42,573	52,047
A ↑	(2.19)	55,152	34,880	43,996				
A ↓	(2.20)	55,240	37,750	41,867				
E	(2.17)	42,200	30,400	29,200				
E ↑	(2.15)	39,800	27,400	27,400				
E ↓	(2.16)	42,200	29,000	28,000				
M	(2.18)	41,000	28,200	27,700	P _a	41,000	28,200	27,700
R	(2.14)	26,547	15,018	19,473	P _{s max}	36,329	18,027	25,721
R ↑	(2.11)	25,706	10,354	19,473				
R ↓	(2.12)	22,733	13,682	15,900				
B	(2.5)	4,800	3,600	2,600	U _{max}	4,800	3,600	2,600
\bar{B}	(2.6)	-0,810	2,554	-1,689	\bar{U}	1,344	2,554	1,689

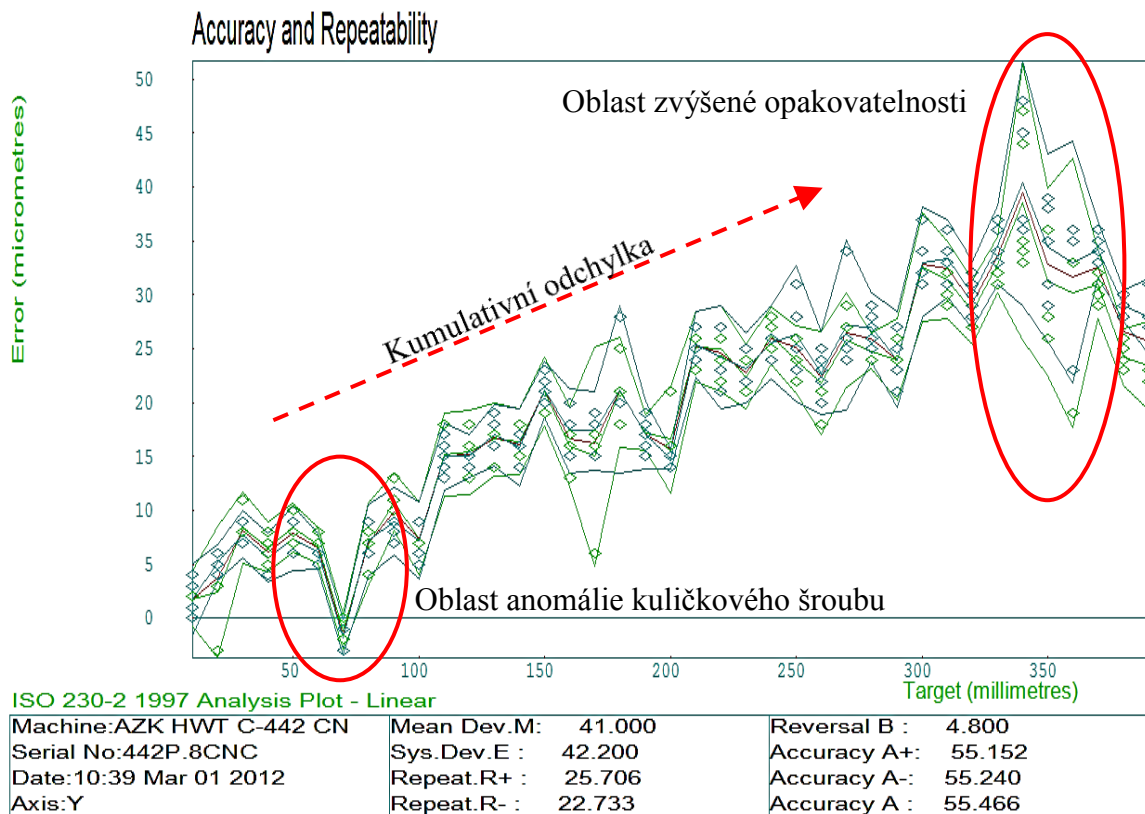
V tabulce (Tab. 7) jsou jednotlivé porovnávané parametry popsány a zdůvodněny buď jejich shody nebo v případě pouhé podobnosti, příčiny rozdílných hodnot.

Tab. 7. Porovnání norem ČSN ISO 230-2:2006 a VDI/DGQ 3441.[11]

ISO 230-2:2006	VDI/DGQ 3441	Porovnání
<p>Průměrná dvousměrná polohová úchylka v ose</p> $M = \max[\bar{x}_i] - \min[\bar{x}_i]$	<p>Odchylka nastavení polohy</p> $P_a = \bar{x}_{jmax} - \bar{x}_{jmin} $	<p>Identické – rozdíl mezi největší a nejmenší průměrnou hodnotou dvousměrných polohových úchylek.</p>
<p>Průměrná necitlivost v ose</p> $\bar{B} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m B_i$ <p>kde: $B_i = \bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow$</p>	<p>Průměrná necitlivost</p> $\bar{U} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m U_j$ <p>kde: $U_j = \bar{x}_j \downarrow - \bar{x}_j \uparrow$</p>	<p>Podobné – vzhledem k rozdílu v rovnicích jsou hodnoty odlišné (osa Y a Z). Hodnoty osy X jsou stejné, protože $\bar{x}_i \uparrow, \bar{x}_i \downarrow$ nekříží nulovou čáru úchylek ani sebe samé.</p>
<p>Necitlivost v ose</p> $B = \max[B_i]$	<p>Maximální necitlivost v poloze</p> $U_{max} = \max[U_j]$	<p>Identické – maximální necitlivost.</p>
<p>Dvousměrná přesnost nastavení polohy v ose</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>Přesnost (nejistota) nastavení polohy</p> $P = [\bar{x}_j + \frac{1}{2}(U_j + P_{sj})]_{max}$ $- [\bar{x}_j - \frac{1}{2}(U_j + P_{sj})]_{min}$	<p>Podobné – P používá oproti A trojnásobnou standardní odchylku a je proto větší u všech měřených os.</p>
<p>Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose</p> $R \uparrow = \max[R_i \uparrow]$ $R \downarrow = \max[R_i \downarrow]$	<p>Maximální rozptyl (opakovatelnost) nastavení polohy</p> $P_{smax} = P_{sjmax}$ $= \max[6\bar{s}_j]$	<p>Podobné – P_{smax} používá oproti R trojnásobnou hodnotu standardní odchylky.</p>
<p>Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose</p> $R = \max[R_i]$	<p>Žádný ekvivalentní parametr</p>	<p>Kdyby B a U byly nulové, potom $2/3 P_{smax}$ budou podobné R. Nejsou, takže platí, že $\bar{U} + 2/3 P_{smax}$ jsou podobné R.</p>

7 ZÁVĚRY A PRAKTICKÉ APLIKACE

7.1 Vyhodnocení stavu polohovacích mechanismů stroje

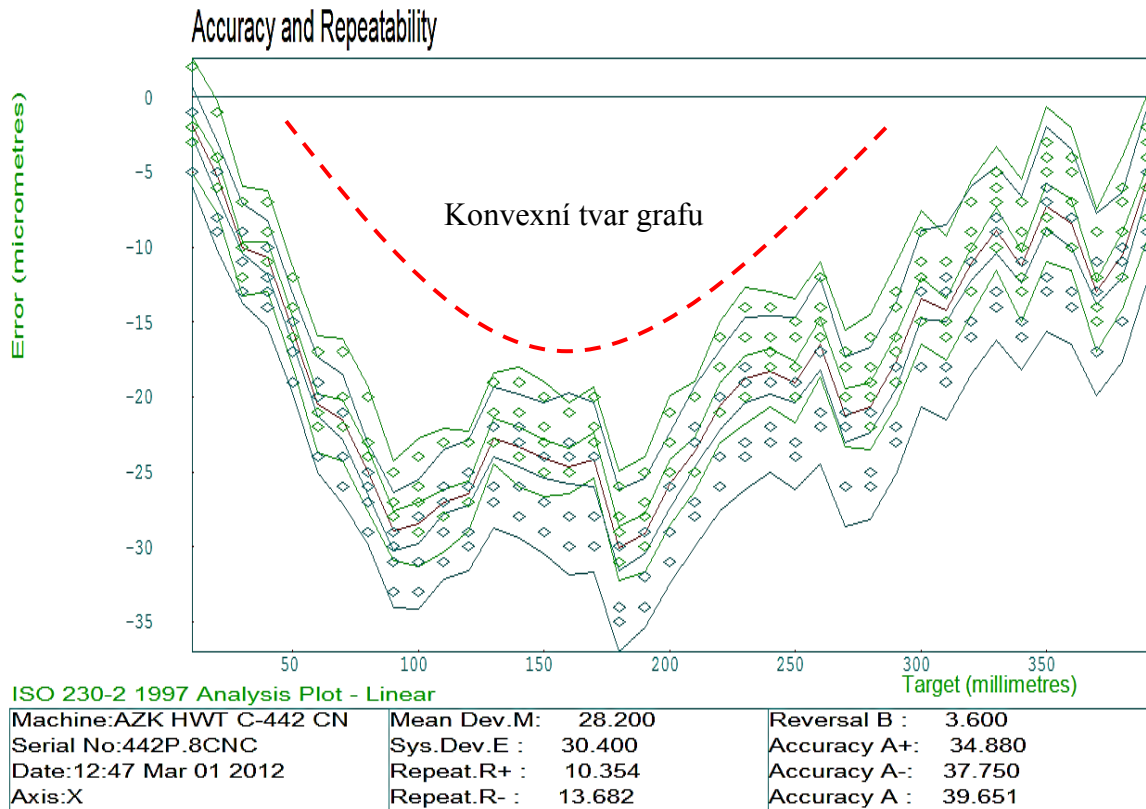


Obr. 64. Nedostatky polohování v ose Y.

Z grafu polohování osy Y lze vyvodit tyto závěry:

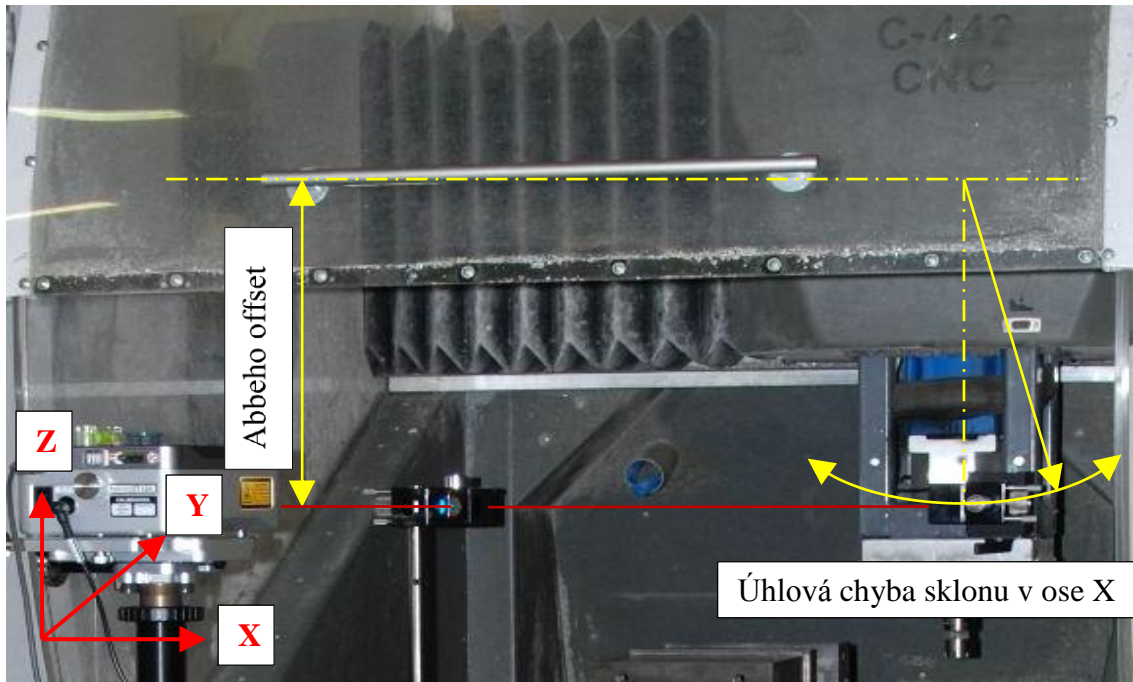
- S narůstající délkou kuličkového šroubu narůstají kumulativní odchylky v kladném směru. Je to způsobeno větším stoupáním kuličkového šroubu, které mohlo vzniknout:
 - již při výrobě kuličkového šroubu nabroušením většího stoupání;
 - natažením kuličkového šroubu při provozu stroje;
 - zahřátím šroubu při polohování a teplotou okolí v místě měření polohování, která mohla být vyšší než teplota, při které bylo stoupání šroubu broušeno.
- V sedmé zadané poloze je oblast silně zhuštěných datových bodů s velmi malou opakovatelností a necitlivostí v poloze, s náhlým poklesem kumulativní odchylky. Pravděpodobně se jedná o deformované místo na kuličkovém šroubu.

- Mezi zadanými polohami č.33 a č.37 je oblast se zvýšenou opakovatelností. Příčinou je zřejmě závada na vodících plochách osy Y nebo jejich ochranných krytech, které způsobují, že v matici kuličkového šroubu vznikají protisměrné axiální síly.

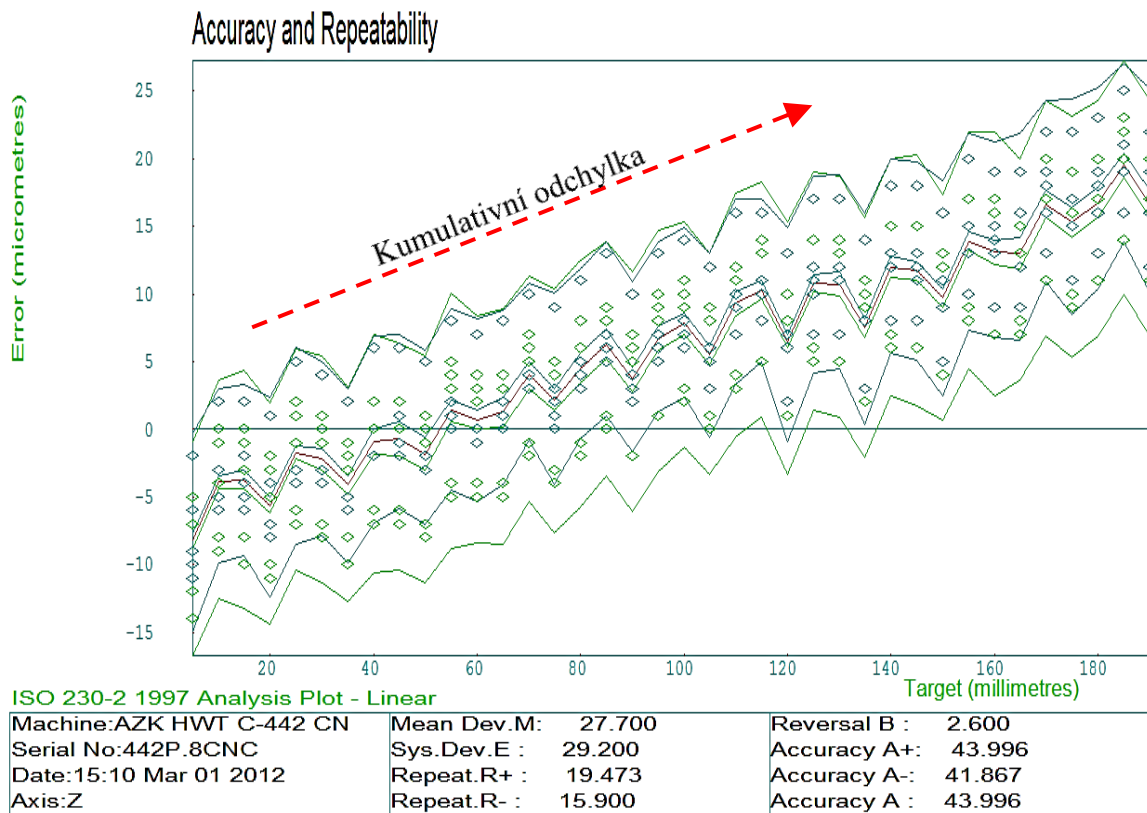


Obr. 65. Nedostatky polohování v ose X.

Podle tvaru grafu osy X lze usuzovat na existenci úhlové chyby sklonu v ose (pitch error), která byla znásobena značným Abbeho offsetem mezi osou kuličkového šroubu a dráhou laserového paprsku. Tato úhlová chyba je zřejmě způsobena prohnutím vodících ploch osy X společně s kuličkovým šroubem vlivem zatížení mechanismem vertikální osy Z.



Obr. 66. Úhlová chyba polohování osy X.



Obr. 67. Nedostatky polohování v ose Z.

Z grafu polohování vertikální osy Z lze vyčíst kumulativní narůstání odchylek v kladném směru, což je způsobeno větším stoupáním (prodloužením) kuličkového šroubu. Zdrojem většího stoupání může být:

- šroub s větším stoupáním byl takto již vyroben;
- šroub byl natažen při provozu stroje;
- k prodloužení šroubu došlo vlivem kompenzace tepelné dilatace vřeteníku.

Výrobce stroje instaloval do svislých profilů vřeteníku topná tělesa a teplota vřeteníku je pomocí teplotního čidla regulována na teplotu $40^{\circ}\text{C}\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. K této kompenzaci tepelné dilatace přistoupil výrobce po zjištění, že ohřevem vřeteníku od motoru vřetene a ložisek vřetene došlo po ustálení provozní teploty k prodloužení vřeteníku (poklesu nástroje) v řádu $0,1\text{mm}$ oproti studenému stavu. Mohlo dojít k tomu, že výrobce při výrobě kuličkového šroubu nekorigoval jeho stoupání na provozní teplotu 40°C a šroub je primárně určený pro provoz při 20°C . Také nemusí správně fungovat regulace ohřevu vřeteníku.

7.2 Návrhy praktických aplikací pro zlepšení polohování

Z měření polohování a technických dat frézky HWT C-442 CNC vyplývá:

- dvousměrná přesnost nastavení polohy v ose A se pohybuje dle normy ČSN ISO 230-2:2006 v rozmezí $40\mu\text{m}$ - $55\mu\text{m}$;
 - zásadním způsobem je ovlivněna systematickou kumulativní chybou kuličkových šroubů v osách Y a Z . V ose X zase systematickou úhlovou chybou sklonu v ose (pitch error).
- dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose R se pohybuje dle normy ČSN ISO 230-2:2006 v rozmezí $15\mu\text{m}$ - $27\mu\text{m}$;
 - je výrazně zhoršena v několika posledních polohách osy Y a tím zároveň zvětšuje hodnotu přesnosti nastavení v této ose.
- maximální hodnota necitlivosti v ose B se pohybuje dle normy ČSN ISO 230-2:2006 v rozmezí $3\mu\text{m}$ - $5\mu\text{m}$;
 - ukazuje na dobrou interakci matic s kuličkovými šrouby.

- z grafů měření polohování lze určit zdroje systematických chyb;
 - systematické chyby, které lze odstranit bez dalších konstrukčních úprav jsou:
 - deformované místo na kuličkovém šroubu mezi šestou a osmou polohou osy Y – lze opravit přebroušením šroubu nebo jeho výměnou;
 - zvýšená opakovatelnost v posledních polohách osy Y – po zjištění pravé příčiny lze přebrousit vodící plochy, uvolnit zadržávající kryty, apod.;
 - pokud bude pro obrábění ve směru osy Y dostačující rozsah mezi oběma výše zmiňovanými místy, potom je možno posunout svěrák na pracovním stole frézky tak, aby se jeho upínací část nacházela mezi nimi;
 - prověřit, případně seřídít ohřev vřeteníku osy Z.
- dle technických specifikací stroje je rozlišení (min. programovatelný krok) rovno hodnotě $6,25\mu\text{m}$;
 - tuto hodnotu lze dle výrobce upgradovat na poloviční krok, tedy $3,125\mu\text{m}$.

Po odstranění výše daných pravděpodobných závad již dále nelze bez zásadních konstrukčních úprav zlepšit hodnoty přesnosti nastavení polohy. Opakovatelnost nastavení polohy je při absenci systematických chyb (zadržávající kryty, naražené vodící plochy, vůle či opotřebení pohybového mechanismu, zahřívání kuličkového šroubu apod.) náhodnou chybou a je dána konstrukcí a stavem matice kuličkového šroubu.

7.2.1 Aplikace rotačních snímačů pohonových servomotorů

Prvním krokem zlepšení přesnosti polohování by bylo přidání rotačních snímačů na upgradované krokové motory. Rotační snímače by plnily funkci pojistky pro případné vynechání kroku motorů.

Efektivnější zlepšení by zajistila výměna krokových motorů za servomotory, kterými by se v součinnosti s rotačními snímači se zpětnou vazbou (polouzavřená smyčka) zajistila rozlišitelnost v řádu $0,1\mu\text{m}$. Systematickou kumulativní chybu ani úhlovou chybu by však neodstranily.

7.2.2 Aplikace lineárního měření nastavení polohy

Efektivním prostředkem eliminace systematických chyb kuličkových šroubů, jako jsou kumulativní odchylky, periodické odchylky, házení ložisek uložení kuličkových šroubů, termální expanze a Abbeho chyby by byla implementace lineárních pravítek, které by spolu se servomotory a zpětnovazebními regulátory tvořily uzavřenou smyčku.

Zatímco úlohou rotačních snímačů by bylo řízené natočení kuličkového šroubu v součinnosti s jeho stoupáním, předností lineárních pravítek je oproti rotačním snímačům přesné určení lineární polohy v dané pohybové ose. Rozlišitelnost lineárních snímačů je v řádu $0,01\mu\text{m}$.

Hlavní výhodou lineárních snímačů by byla možnost softwarové kompenzace (korekce) nastavené polohy vzhledem k zadané poloze, na rozdíl od polouzavřené smyčky rotačního snímače, kterou nelze kompenzovat, protože lineární poloha v dané ose je zatížena systematickou nereprodukovatelnou chybou vlivem ohřevu šroubu.

Současný řídicí systém měřené frézky neumožňuje kompenzaci polohování. Dle autora řídicího systému COMETS by se muselo přepsat jádro zabezpečující pohyb, případně by se musel dodělat externí modul, který by prováděl regulaci pohonů na základě pozice z jádra systému.

Implementací servomotorů společně s lineárními pravítky a regulací by bylo možné dosáhnout po upgradu řídicího systému výrazného zlepšení přesnosti nastavení polohy.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zjištění přesnosti polohování frézky HWT C-442 CNC, která je určena především pro výrobu grafitových elektrod, frézování plastů, dřeva, hliníku apod.

V teoretické části byla popsána přesnost (nejistota) nastavení polohy jako těsnost shody mezi požadovanou a nastavenou polohou, rozlišení jako nejmenší změna polohy která může být realizována a opakovatelnost jako míra schopnosti systému důsledně se vracet do stejné pozice.

Byl vysvětlen základní princip laserového interferometru a chyby vznikající jeho nevhodným seřazením, jakož i vliv prostředí na interferometrická měření a důležitost jeho kompenzace na kvalitu měření.

V praktické části byly laserinterferometrem Renishaw XL80 změřeny všechny tři pohybové osy frézky a vyhodnoceny parametry podle normy ČSN ISO 230-2:2006 a spočítány hodnoty odhadu nejistoty měření polohování. Dále byly vyhodnoceny parametry polohování podle normy VDI/DGQ 3441 a porovnány s parametry dle ČSN ISO 230-2:2006.

Grafy polohování jednotlivých os byly analyzovány a byly určeny pravděpodobné příčiny, negativně ovlivňující přesnost polohování. Byly navrženy úpravy pro odstranění těchto identifikovaných zdrojů systematických chyb.

Byly navrženy dvě varianty konstrukčních změn stroje, které zásadním způsobem zlepšují přesnost polohování za podmínek dodatečných finančních nákladů, zásahů do jeho řídicího systému a zřejmě i nezbytných úprav kostry stroje.

V diplomové práci byl objasněn vliv proměnlivé teploty na kvalitu polohování a tím na kvalitu obrábění, které vyžaduje teplotně stabilizovaný obráběcí stroj, nejen po stránce vlastní konstrukce, ale i teploty dílny, ve které je umístěn.

Byl vysvětlen rušivý vliv oteplení kuličkového šroubu na přesnost polohování a odstranění tohoto jevu použitím přímého odměřování polohy nástroje lineárními snímači polohy.

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 WWW: <http://www.infocube.cz/images/machining-tooling/clanky/50_Zkousky%20presnosti%20obrabecich%20stroju.pdf>.
- [2] NOVÁK, Pavel . *Přesnost polohování obráběcích strojů, souhrn vlivů a statická měření lineárních os*. [s.l.], 2006. 68 s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [3] MAREK, Jiří, et al. *Konstrukce CNC obráběcích strojů : MM Speciál. 2.* upravené a doplněné vydání. Praha : MM publishing, s.r.o., 2010. Zkoušení CNC obráběcích strojů, s. 420. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [4] ČSN ISO 230-1. *Zásady zkoušek obráběcích strojů : Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění*. Praha : Český normalizační institut, 1997. 92 s.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] *Accuracy of machine tools* [online]. 2011 [cit. 2011-12-15]. Dostupné z WWW: <http://blog.ncut.edu.tw/userfile/3120/02_AccuracyofMachineTools.pdf>.
- [8] *Accuracy inspection&equipment* [online]. 2011 [cit. 2011-12-15]. Dostupné z WWW: <http://blog.ncut.edu.tw/userfile/3120/04_AccuracyInspection&Equipment.pdf>.
- [9] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů : Teplotní rušivé vlivy - příklady naměřených hodnot* [online]. 2011 [cit. 2011-12-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.cnckonstrukce.cz/blog/teplotni-rusive-vlivy-priklady-namerenych-hodnot>>.

- [10] ŠTĚDRÝ, Jan. Vliv odměřování na přesnost obráběcích strojů. *Raptor a.s.* 2010 [cit. 2011-12-13]. Dostupné z: <http://www.raptor-as.cz/cz/strojirenstvi/aktuality/vliv-odmerovani-na-presnost-obrabecich-stroju>
- [11] 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>.
- [12] VDI/DGQ 3441. *Statistische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen : Grundlagen*. Düsseldorf : VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 1977. 21 s.
- [13] ČSN ISO 230-3. *Zásady zkoušek obráběcích strojů : Určení tepelných vlivů*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 44 s.
- [14] ČSN ISO 230-4. *Zásady zkoušek obráběcích strojů : Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 24 s.
- [15] ČSN ISO 230-5. *Zkušební předpisy pro obráběcí stroje : Určení emise hluku*. Praha : Český normalizační institut, 2001. 32 s.
- [16] ČSN ISO 230-6. *Zásady zkoušek obráběcích strojů : Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn (Zkouška diagonálního přestavení)*. Praha : Český normalizační institut, 2003. 12 s.
- [17] MAREŠ, Adam. *Kalibrace dílenského mikroskopu Zeiss bezkontaktním způsobem s využitím laserinterferometru Renishaw*. Zlín, 2011. 79 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [18] *Renishaw : Laser XL-80 manual* [online]. 2011 [cit. 2011-12-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.renishaw.com/lasercalsupport/en/laser-calibration-systems-support-and-faq--11975>>.
- [19] *Feanor : Principles of operation* [online]. 2011 [cit. 2011-12-14]. Dostupné z WWW: <http://www.feanor.com/laser_principles.pdf>.
- [20] PATA, Vladimír. *Základní aplikace interferometrů v průmyslu*. [s.l.], 2010. 35 s. Výukové podklady. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.

- [21] *Renishaw : Laserový systém XL-80* [online]. 2007 [cit. 2011-12-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.renishaw.cz/cs/laserove-interferometricke-systemy--6800>>.
- [22] *AZK - Frézky HWT* [online]. 2012 [cit. 2012-03-09]. Dostupné z: <http://www.azk.cz/hwt.php?lang=cz>
- [23] PATA, Vladimír. *Aplikace laserového interferometru při stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách dle ČSN ISO 230-2*. [s.l.], 2010. 21 s. Výukové podklady. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [24] *Linear Encoders with Single-Field Scanning: Heidenhain* [online]. 2012 [cit. 2012-03-20]. Dostupné z: http://www.heidenhain.cz/cs_CZ/dokumentace-informace/dokumentace/technicke-informace/

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

APT	Automatic Picture Transmission
ASME	American Society of Mechanical Engineers
CNC	Computer Numerical Control
ČSN	Česká technická Norma
ETVE	Environmental Temperature Variation Error
HPGL	Hewlett-Packard Graphics Language
ISO	International Organization for Standardization
JIS	Japanese Industrial Standards
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED	Light-Emitting Diode
PC	Personal Computer
USB	Universal Serial Bus
VDI/DGQ	Verein Deutscher Ingenieure/Deutsche Gesellschaft für Qualität

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

A	Dvousměrná přesnost nastavení polohy v ose
$A \uparrow, A \downarrow$	Jednosměrná přesnost nastavení polohy v ose
B	Necitlivost v ose
B_i	Necitlivost v poloze
\bar{B}	Průměrná necitlivost v ose
E	Dvousměrná systematická polohová úchylka v ose
$E \uparrow, E \downarrow$	Jednosměrná systematická polohová úchylka v ose
M	Průměrná dvousměrná polohová úchylka v ose
P	Přesnost nastavení polohy (VDI/DGQ 3441)
P_a	Odchylka nastavení polohy (VDI/DGQ 3441)
P_i	Zadaná poloha
P_{ij}	Skutečná poloha
$P_{s \max}$	Maximální rozptyl (opakovatelnost) nastavení polohy (VDI/DGQ 3441)
P_{sj}	Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze (VDI/DGQ 3441)
R	Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose
$R \uparrow, R \downarrow$	Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose
R_i	Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze
$R_i \uparrow, R_i \downarrow$	Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze
$S_i \uparrow, S_i \downarrow$	Odhad jednosměrné opakovatelnosti osy nastavení polohy v poloze
\bar{s}_j	Průměrná dvousměrná standardní odchylka v poloze (VDI/DGQ 3441)
U_j	Necitlivost v poloze (VDI/DGQ 3441)
U_{\max}	Maximální necitlivost v poloze (VDI/DGQ 3441)
\bar{U}	Průměrná necitlivost (VDI/DGQ 3441)
x_{ij}	Polohová úchylka

\bar{x}_i	Průměrná dvousměrná polohová úchylka v poloze
$\bar{x}_i \uparrow, \bar{x}_i \downarrow$	Průměrná jednosměrná polohová úchylka v poloze
$\bar{\bar{x}}_j$	Průměrná dvousměrná polohová úchylka v poloze (VDI/DGQ 3441)
$\bar{x}_j \downarrow, \bar{x}_j \uparrow$	Průměrná jednosměrná polohová úchylka v poloze (VDI/DGQ 3441)

SEZNAM POUŽITÉHO ANGLICKÉHO NÁZVOSLOVÍ

accuracy	přesnost
actual	skutečný
axial	axiální
axis	osa
backlash	vůle, mrtvý chod
backward	zpětný pohyb
bidirectional	dvousměrný
capture	snímat
dead path	mrtvá dráha
deviation	odchylka
device	zařízení
digit	čísllice
direction	směr
environment	okolní prostředí
estimator	odhad
expanded	rozšířený
first	první
forward	dopředný pohyb
horizontal	vodorovný
interval size	velikost intervalu
last	poslední
linear	lineární
machine tool	obráběcí stroj
mean	střední

measurement	měřící
misalignment	přesazení
number	číslo
pitch error	chyba sklonu
position	poloha
positioning	nastavení polohy
repeatability	opakovatelnost
resolution	rozlišení
reversal value	necitlivost
roll error	chyba rotace
run	chod
select	výběr
sequence	pořadí
squareness	kolmost
stable	stabilní
straightness	přímost
systematic	systematický
target	cíl, terč
thermal drift	teplotní dilatace
travel	dráha
uncertainty	nejistota
unidirectional	jednosměrný
unlinearities	nelinearity
vertical	svislý
yaw error	chyba vybočení

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Přejímací zkoušky CNC obráběcích strojů. [3]	13
Obr. 2. Definice přímosti. [4]	15
Obr. 3. Definice parametrů udávaných u zkoušek polohování. [5]	16
Obr. 4. Základní parametry stavění polohy v ose. [7]	19
Obr. 5. Šest stupňů volnosti v prostoru. [6]	20
Obr. 6. Znázornění chyb vodících ploch. [6]	20
Obr. 7. Znázornění přesnosti versus opakovatelnost. [6]	21
Obr. 8. Teplotní rušivé vlivy. [9]	22
Obr. 9. Princip rotačního snímače. [6]	23
Obr. 10. Princip lineárního snímače. [24]	24
Obr. 11. Běžný zkušební cyklus. [5]	29
Obr. 12. Jednosměrná přesnost a opakovatelnost nastavení polohy. [5]	32
Obr. 13. Dvousměrná přesnost a opakovatelnost nastavení polohy. [5]	34
Obr. 14. Michelsonův interferometr. [19]	37
Obr. 15. Princip konstruktivní a destruktivní interference. [18][20]	39
Obr. 16. Laserový systém Renishaw XL-80. [21]	40
Obr. 17. Kompenzátor XC-80. [18]	41
Obr. 18. Možnosti laserového systému XL-80. [18]	42
Obr. 19. Sestava laserového systému pro měření lineární polohy. [18]	43
Obr. 20. Sestava optických prvků pro lineární měření. [18]	44
Obr. 21. Sestava optických prvků pro lineární měření v pravém úhlu. [20]	44
Obr. 22. Sestava optických prvků se směrovacím zrcadlem. [18]	45
Obr. 23. Znázornění chyby mrtvé dráhy. [19]	46
Obr. 24. Znázornění příčiny cosinovy chyby. [19]	47
Obr. 25. Znázornění Abbeho chyby. [19]	48
Obr. 26. Vyhodnocení chyb laserového měření bez kompenzace vlivu prostředí. [19]	50
Obr. 27. Vyhodnocení chyb laserového měření s kompenzací vlivu prostředí. [19]	50
Obr. 28. Frézka HWT C-442 CNC profiverze. [22]	52
Obr. 29. Interface řídicího systému COMETS. [22]	54
Obr. 30. Vyrovnání laseru vodováhou.	55
Obr. 31. Nastavení clony laseru pro menší průměr paprsku (ilustrace). [18]	56
Obr. 32. Ustavení lineárního odražeče na stroj	57

Obr. 33. Zmenšený laserový paprsek na terči lineárního odražeče (ilustrace). [18]	57
Obr. 34. Odražený paprsek na cloně laserové hlavice (ilustrace). [18]	58
Obr. 35. Vyrovnání interferometru a odražeče (ilustrace). [18]	58
Obr. 36. Vyrovnání interferometru a odražeče na měřeném stroji.	59
Obr. 37. Lineární interferometr po vyrovnání (ilustrace). [18]	59
Obr. 38. Poloha paprsků na cloně laseru (ilustrace). [18].....	60
Obr. 39. Měřicí poloha laserové clony (ilustrace). [18].....	60
Obr. 40. Pohled na měřenou frézku s vyznačenými pohybovými osami.	61
Obr. 41. Interface softwaru Renishaw Laser XL Capture.	62
Obr. 42. První dialogové okno nastavení terčů.....	63
Obr. 43. Druhé dialogové okno nastavení terčů.	63
Obr. 44. Třetí dialogové okno nastavení terčů.....	64
Obr. 45. Čtvrté dialogové okno nastavení terčů.	64
Obr. 46. Počáteční hodnoty pro manuální kompenzaci vlivu prostředí (osa Y).....	65
Obr. 47. Dialogové okno počátečních hodnot pro manuální kompenzaci (osa Y).	65
Obr. 48. Konečné hodnoty pro manuální kompenzaci vlivu prostředí (osa Y).....	66
Obr. 49. Dialogové okno konečných hodnot pro manuální kompenzaci (osa Y).....	66
Obr. 50. Lineární bidirekcionální cyklus. [23]	67
Obr. 51. Okno snímání dat.....	68
Obr. 52. Nastavení optických prvků při měření osy X.	68
Obr. 53. Nastavení optických prvků při měření osy Z.....	69
Obr. 54. Menu analýzy softwaru Renishaw LaserXL Capture.....	73
Obr. 55. Graf polohování osy Y podle normy ISO 230-2.	74
Obr. 56. Vyhodnocení polohování osy Y podle normy ISO 230-2.....	74
Obr. 57. Graf polohování osy X podle normy ISO 230-2.	75
Obr. 58. Vyhodnocení polohování osy X podle normy ISO 230-2.....	75
Obr. 59. Graf polohování osy Z podle normy ISO 230-2.....	76
Obr. 60. Vyhodnocení polohování osy Z podle normy ISO 230-2.....	76
Obr. 61. Graf polohování osy Y podle normy VDI/DGQ 3441.	86
Obr. 62. Graf polohování osy X podle normy VDI/DGQ 3441.	86
Obr. 63. Graf polohování osy Z podle normy VDI/DGQ 3441.....	87
Obr. 64. Nedostatky polohování v ose Y.....	89
Obr. 65. Nedostatky polohování v ose X.....	90

Obr. 66. Úhlová chyba polohování osy X.	91
Obr. 67. Nedostatky polohování v ose Z.	91

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Základní parametry frézky HWT C-442 CNC. [22].....	53
Tab. 2. Odhad nejistoty měření polohování osy Y.	82
Tab. 3. Odhad nejistoty měření polohování osy X.	83
Tab. 4. Odhad nejistoty měření polohování osy Z.....	84
Tab. 5. Parametry polohování dle ČSN ISO 230-2:2006 včetně odhadu nejistot.	85
Tab. 6. Vyhodnocené parametry měření polohování.....	87
Tab. 7. Porovnání norem ČSN ISO 230-2:2006 a VDI/DGQ 3441.[11].....	88

SEZNAM ROVNIC

(2.1)	Průměrná jednosměrná polohová úchylka v poloze $\bar{x}_i \uparrow$	30
(2.2)	Průměrná jednosměrná polohová úchylka v poloze $\bar{x}_i \downarrow$	30
(2.3)	Průměrná dvousměrná polohová úchylka v poloze \bar{x}_i	30
(2.4)	Necitlivost v poloze B_i	31
(2.5)	Necitlivost v ose B	31
(2.6)	Průměrná necitlivost v ose \bar{B}	31
(2.7)	Odhad jednosměrné opakovatelnosti osy nastavení polohy v poloze $s_i \uparrow$..	31
(2.8)	Odhad jednosměrné opakovatelnosti osy nastavení polohy v poloze $s_i \downarrow$...	31
(2.9)	Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze $R_i \uparrow$	32
(2.10)	Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze $R_i \downarrow$	32
(2.11)	Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose $R \uparrow$	32
(2.12)	Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose $R \downarrow$	32
(2.13)	Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze R_i	33
(2.14)	Dvousměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose R	33
(2.15)	Jednosměrná systematická polohová úchylka v ose $E \uparrow$	33
(2.16)	Jednosměrná systematická polohová úchylka v ose $E \downarrow$	33
(2.17)	Dvousměrná systematická polohová úchylka v ose E	33
(2.18)	Průměrná dvousměrná polohová úchylka v ose M	33
(2.19)	Jednosměrná přesnost nastavení polohy v ose $A \uparrow$	34
(2.20)	Jednosměrná přesnost nastavení polohy v ose $A \downarrow$	34
(2.21)	Dvousměrná přesnost nastavení polohy v ose A	34
(3.1)	Délka měřená laserinterferometrem L	38
(3.2)	Délka ovlivněná cosinovou chybou L_{LMS}	47
(3.3)	Výpočet vlnové délky laserového paprsku λ	49

(3.4)	Výpočet rychlosti laserového paprsku v	49
(3.5)	Koeficient lomu světla ve vzduchu n	49
(3.6)	Přírůstek koeficientu lomu světla ve vzduchu Δn	49
(3.7)	Závislost koeficientu lomu světla na teplotě $\partial n/\partial T$	49
(3.8)	Závislost koeficientu lomu světla na tlaku $\partial n/\partial P$	49
(3.9)	Závislost koeficientu lomu světla na vlhkosti $\partial n/\partial H$	49
(6.1)	Nejistota měření vlivem měřícího zařízení U_{DEVICE}	77
(6.2)	Nejistota měření vlivem přesazení měřícího zařízení k ose zkoušeného stroje $U_{MISALIGNMENT}$	77
(6.3)	Nejistota měření při měření teploty stroje $U_{M,MACHINE TOOL}$	78
(6.4)	Nejistota měření při měření teploty měřícího zařízení $U_{M,DEVICE}$	78
(6.5)	Nejistota měření vlivem koeficientu teplotní roztažnosti stroje $U_{E,MACHINE TOOL}$	78
(6.6)	Nejistota měření vlivem koeficientu teplotní roztažnosti měřícího zařízení $U_{E,DEVICE}$	79
(6.7)	Nejistota měření vlivem kolísání environmentu U_{EVE}	79
(6.8)	Nejistota měření jednosměrné opakovatelnosti $U(R \uparrow, R \downarrow)$	80
(6.9)	Nejistota měření necitlivosti $U(B)$	80
(6.10)	Nejistota měření dvousměrné opakovatelnosti $U(R)$	80
(6.11)	Nejistota měření systematických úchylek $U(E, E \uparrow, E \downarrow)$	80
(6.12)	Nejistota měření průměrné polohové úchyly $U(M)$	81
(6.13)	Nejistota měření přesnosti polohování $U(A, A \uparrow, A \downarrow)$	81

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: NAMĚŘENÁ DATA OSY Y – LIST 1

PŘÍLOHA P II: NAMĚŘENÁ DATA OSY Y – LIST 2

PŘÍLOHA P III: NAMĚŘENÁ DATA OSY Y – LIST 3

PŘÍLOHA P IV: NAMĚŘENÁ DATA OSY Y – LIST 4

PŘÍLOHA P V: NAMĚŘENÁ DATA OSY X – LIST 1

PŘÍLOHA P VI: NAMĚŘENÁ DATA OSY X – LIST 2

PŘÍLOHA P VII: NAMĚŘENÁ DATA OSY X – LIST 3

PŘÍLOHA P VIII: NAMĚŘENÁ DATA OSY X – LIST 4

PŘÍLOHA P IX: NAMĚŘENÁ DATA OSY Z – LIST 1

PŘÍLOHA P X: NAMĚŘENÁ DATA OSY Z – LIST 2

PŘÍLOHA P XI: NAMĚŘENÁ DATA OSY Z – LIST 3

PŘÍLOHA P XII: NAMĚŘENÁ DATA OSY Z – LIST 4

PŘÍLOHA P I: NAMĚŘENÁ DATA OSY Y – LIST 1

P_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_i \uparrow$ [mm]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$x_i 1 \uparrow$ [μm]	3	-3	11	8	10	8	0	4	13	9
$x_i 2 \uparrow$ [μm]	3	4	9	7	9	7	-1	9	11	9
$x_i 3 \uparrow$ [μm]	2	4	8	7	8	6	-1	8	10	7
$x_i 4 \uparrow$ [μm]	1	4	7	6	8	7	-2	7	10	7
$x_i 5 \uparrow$ [μm]	0	3	7	5	7	6	-2	6	10	5
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm] (2.1)	1,800	2,400	8,400	6,600	8,400	6,800	-1,200	6,800	10,800	7,400
$P_i \downarrow$ [mm]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$x_i 1 \downarrow$ [μm]	4	6	9	7	9	7	-2	9	11	9
$x_i 2 \downarrow$ [μm]	3	6	9	6	9	7	-1	9	10	9
$x_i 3 \downarrow$ [μm]	1	5	7	6	7	6	-2	6	8	7
$x_i 4 \downarrow$ [μm]	1	4	7	5	6	5	-1	6	9	6
$x_i 5 \downarrow$ [μm]	0	5	7	4	6	6	-3	6	7	5
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm] (2.2)	1,800	5,200	7,800	5,600	7,400	6,200	-1,800	7,200	9,000	7,200
\bar{x}_i [μm] (2.3)	1,800	3,800	8,100	6,100	7,900	6,500	-1,500	7,000	9,900	7,300
$s_i \uparrow$ [μm] (2.7)	1,304	3,050	1,673	1,140	1,140	0,837	0,837	1,924	1,304	1,673
$s_i \downarrow$ [μm] (2.8)	1,643	0,837	1,095	1,140	1,517	0,837	0,837	1,643	1,581	1,789
$\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow$ [μm]	4,408	8,499	11,747	8,880	10,680	8,473	0,473	10,647	13,408	10,747
$\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow$ [μm]	-0,808	-3,699	5,053	4,320	6,120	5,127	-2,873	2,953	8,192	4,053
$\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow$ [μm]	5,086	6,873	9,991	7,880	10,433	7,873	-0,127	10,486	12,162	10,778
$\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow$ [μm]	-1,486	3,527	5,609	3,320	4,367	4,527	-3,473	3,914	5,838	3,622
$R_i \uparrow$ [μm] (2.9)	5,215	12,198	6,693	4,561	4,561	3,347	3,347	7,694	5,215	6,693
$R_i \downarrow$ [μm] (2.10)	6,573	3,347	4,382	4,561	6,066	3,347	3,347	6,573	6,325	7,155
B_i [μm] (2.4)	0,000	-2,800	0,600	1,000	1,000	0,600	0,600	-0,400	1,800	0,200
R_i [μm] (2.13)	6,573	12,198	6,693	5,561	6,314	3,947	3,947	7,694	7,570	7,155

PŘÍLOHA P II: NAMĚŘENÁ DATA OSY Y – LIST 2

P_i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$P_i \uparrow$ [mm]	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
$x_i 1 \uparrow$ [μm]	18	18	18	18	23	18	6	21	18	21
$x_i 2 \uparrow$ [μm]	16	16	18	18	22	16	18	21	18	15
$x_i 3 \uparrow$ [μm]	15	16	17	16	21	17	18	20	17	15
$x_i 4 \uparrow$ [μm]	14	14	16	15	20	16	17	25	16	16
$x_i 5 \uparrow$ [μm]	13	13	14	15	19	13	16	18	17	16
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm] (2.1)	15,200	15,400	16,600	16,400	21,000	16,000	15,000	21,000	17,200	16,600
$P_i \downarrow$ [mm]	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
$x_i 1 \downarrow$ [μm]	17	16	19	18	23	18	19	20	19	14
$x_i 2 \downarrow$ [μm]	16	16	18	17	22	18	19	20	15	15
$x_i 3 \downarrow$ [μm]	15	15	16	16	21	16	18	28	18	15
$x_i 4 \downarrow$ [μm]	14	14	16	14	20	15	16	18	16	15
$x_i 5 \downarrow$ [μm]	13	14	16	14	20	20	15	20	17	15
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm] (2.2)	15,000	15,000	17,000	15,800	21,200	17,400	17,400	21,200	17,000	14,800
\bar{x}_i [μm] (2.3)	15,100	15,200	16,800	16,100	21,100	16,700	16,200	21,100	17,100	15,700
$s_i \uparrow$ [μm] (2.7)	1,924	1,949	1,673	1,517	1,581	1,871	5,099	2,550	0,837	2,510
$s_i \downarrow$ [μm] (2.8)	1,581	1,000	1,414	1,789	1,304	1,949	1,817	3,899	1,581	0,447
$\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow$ [μm]	19,047	19,299	19,947	19,433	24,162	19,742	25,198	26,099	18,873	21,620
$\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow$ [μm]	11,353	11,501	13,253	13,367	17,838	12,258	4,802	15,901	15,527	11,580
$\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow$ [μm]	18,162	17,000	19,828	19,378	23,808	21,299	21,033	28,997	20,162	15,694
$\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow$ [μm]	11,838	13,000	14,172	12,222	18,592	13,501	13,767	13,403	13,838	13,906
$R_i \uparrow$ [μm] (2.9)	7,694	7,797	6,693	6,066	6,325	7,483	20,396	10,198	3,347	10,040
$R_i \downarrow$ [μm] (2.10)	6,325	4,000	5,657	7,155	5,215	7,797	7,266	15,595	6,325	1,789
B_i [μm] (2.4)	0,200	0,400	-0,400	0,600	-0,200	-1,400	-2,400	-0,200	0,200	1,800
R_i [μm] (2.13)	7,694	7,797	6,693	7,211	6,325	9,040	20,396	15,595	6,325	10,040

PŘÍLOHA P III: NAMĚŘENÁ DATA OSY Y – LIST 3

P_i	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$P_i \uparrow$ [mm]	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
$x_i 1 \uparrow$ [μm]	27	27	24	27	25	24	24	26	26	37
$x_i 2 \uparrow$ [μm]	26	26	24	28	24	23	29	25	25	32
$x_i 3 \uparrow$ [μm]	26	26	22	26	23	23	27	25	24	32
$x_i 4 \uparrow$ [μm]	24	24	21	25	22	21	25	24	24	31
$x_i 5 \uparrow$ [μm]	23	22	21	25	26	18	24	24	21	31
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm] (2.1)	25,200	25,000	22,400	26,200	24,000	21,800	25,800	24,800	24,000	32,600
$P_i \downarrow$ [mm]	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
$x_i 1 \downarrow$ [μm]	27	27	25	28	25	25	34	29	27	37
$x_i 2 \downarrow$ [μm]	27	26	25	26	25	24	27	28	25	34
$x_i 3 \downarrow$ [μm]	25	24	22	26	23	23	26	27	24	32
$x_i 4 \downarrow$ [μm]	24	23	22	24	28	22	25	25	23	31
$x_i 5 \downarrow$ [μm]	24	21	22	24	31	20	24	26	21	31
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm] (2.2)	25,400	24,200	23,200	25,600	26,400	22,800	27,200	27,000	24,000	33,000
\bar{x}_i [μm] (2.3)	25,300	24,600	22,800	25,900	25,200	22,300	26,500	25,900	24,000	32,800
$s_i \uparrow$ [μm] (2.7)	1,643	2,000	1,517	1,304	1,581	2,387	2,168	0,837	1,871	2,510
$s_i \downarrow$ [μm] (2.8)	1,517	2,387	1,643	1,673	3,130	1,924	3,962	1,581	2,236	2,550
$\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow$ [μm]	28,486	29,000	25,433	28,808	27,162	26,575	30,136	26,473	27,742	37,620
$\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow$ [μm]	21,914	21,000	19,367	23,592	20,838	17,025	21,464	23,127	20,258	27,580
$\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow$ [μm]	28,433	28,975	26,486	28,947	32,661	26,647	35,125	30,162	28,472	38,099
$\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow$ [μm]	22,367	19,425	19,914	22,253	20,139	18,953	19,275	23,838	19,528	27,901
$R_i \uparrow$ [μm] (2.9)	6,573	8,000	6,066	5,215	6,325	9,550	8,672	3,347	7,483	10,040
$R_i \downarrow$ [μm] (2.10)	6,066	9,550	6,573	6,693	12,522	7,694	15,849	6,325	8,944	10,198
B_i [μm] (2.4)	-0,200	0,800	-0,800	0,600	-2,400	-1,000	-1,400	-2,200	0,000	-0,400
R_i [μm] (2.13)	6,573	9,550	7,119	6,693	12,522	9,622	15,849	7,036	8,944	10,519

PŘÍLOHA P IV: NAMĚŘENÁ DATA OSY Y – LIST 4

P_i	31	32	33	34	35	36	37	38	39
$P_i \uparrow$ [mm]	310	320	330	340	350	360	370	380	390
$x_i 1 \uparrow$ [μm]	33	30	34	47	35	19	33	23	22
$x_i 2 \uparrow$ [μm]	33	30	34	44	31	33	31	25	23
$x_i 3 \uparrow$ [μm]	32	28	33	35	28	33	32	26	27
$x_i 4 \uparrow$ [μm]	30	27	32	34	26	33	30	24	23
$x_i 5 \uparrow$ [μm]	29	27	31	33	36	33	29	23	22
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm] (2.1)	31,400	28,400	32,800	38,600	31,200	30,200	31,000	24,200	23,400
$P_i \downarrow$ [mm]	310	320	330	340	350	360	370	380	390
$x_i 1 \downarrow$ [μm]	36	32	37	48	38	23	36	29	27
$x_i 2 \downarrow$ [μm]	34	31	36	45	35	36	35	29	28
$x_i 3 \downarrow$ [μm]	33	30	34	37	31	36	34	30	31
$x_i 4 \downarrow$ [μm]	33	28	33	36	29	35	33	29	27
$x_i 5 \downarrow$ [μm]	31	29	33	36	39	35	33	28	27
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm] (2.2)	33,400	30,000	34,600	40,400	34,400	33,000	34,200	29,000	28,000
\bar{x}_i [μm] (2.3)	32,400	29,200	33,700	39,500	32,800	31,600	32,600	26,600	25,700
$s_i \uparrow$ [μm] (2.7)	1,817	1,517	1,304	6,427	4,324	6,261	1,581	1,304	2,074
$s_i \downarrow$ [μm] (2.8)	1,817	1,581	1,817	5,683	4,336	5,612	1,304	0,707	1,732
$\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow$ [μm]	35,033	31,433	35,408	51,453	39,849	42,722	34,162	26,808	27,547
$\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow$ [μm]	27,767	25,367	30,192	25,747	22,551	17,678	27,838	21,592	19,253
$\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow$ [μm]	37,033	33,162	38,233	51,767	43,072	44,225	36,808	30,414	31,464
$\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow$ [μm]	29,767	26,838	30,967	29,033	25,728	21,775	31,592	27,586	24,536
$R_i \uparrow$ [μm] (2.9)	7,266	6,066	5,215	25,706	17,297	25,044	6,325	5,215	8,295
$R_i \downarrow$ [μm] (2.10)	7,266	6,325	7,266	22,733	17,344	22,450	5,215	2,828	6,928
B_i [μm] (2.4)	-2,000	-1,600	-1,800	-1,800	-3,200	-2,800	-3,200	-4,800	-4,600
R_i [μm] (2.13)	9,266	7,795	8,041	26,020	20,520	26,547	8,970	8,822	12,211

PŘÍLOHA P V: NAMĚŘENÁ DATA OSY X – LIST 1

P_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_i \uparrow$ [mm]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$x_i 1 \uparrow$ [μm]	2	-1	-7	-7	-12	-17	-17	-20	-25	-24
$x_i 2 \uparrow$ [μm]	-2	-5	-10	-11	-16	-21	-22	-25	-29	-29
$x_i 3 \uparrow$ [μm]	-2	-4	-10	-10	-15	-20	-20	-23	-27	-26
$x_i 4 \uparrow$ [μm]	-1	-4	-9	-9	-14	-19	-20	-24	-28	-27
$x_i 5 \uparrow$ [μm]	-3	-6	-12	-11	-16	-22	-22	-25	-29	-29
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm] (2.1)	-1,200	-4,000	-9,600	-9,600	-14,600	-19,800	-20,200	-23,400	-27,600	-27,000
$P_i \downarrow$ [mm]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$x_i 1 \downarrow$ [μm]	-3	-6	-10	-12	-16	-21	-22	-25	-30	-29
$x_i 2 \downarrow$ [μm]	-3	-8	-11	-13	-17	-22	-24	-27	-31	-31
$x_i 3 \downarrow$ [μm]	-1	-5	-9	-10	-15	-20	-21	-26	-28	-28
$x_i 4 \downarrow$ [μm]	-5	-9	-13	-14	-19	-24	-26	-29	-33	-33
$x_i 5 \downarrow$ [μm]	-1	-5	-9	-10	-15	-19	-21	-25	-29	-28
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm] (2.2)	-2,600	-6,600	-10,400	-11,800	-16,400	-21,200	-22,800	-26,400	-30,200	-29,800
\bar{x}_i [μm] (2.3)	-1,900	-5,300	-10,000	-10,700	-15,500	-20,500	-21,500	-24,900	-28,900	-28,400
$s_i \uparrow$ [μm] (2.7)	1,924	1,871	1,817	1,673	1,673	1,924	2,049	2,074	1,673	2,121
$s_i \downarrow$ [μm] (2.8)	1,673	1,817	1,673	1,789	1,673	1,924	2,168	1,673	1,924	2,168
$\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow$ [μm]	2,647	-0,258	-5,967	-6,253	-11,253	-15,953	-16,101	-19,253	-24,253	-22,757
$\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow$ [μm]	-5,047	-7,742	-13,233	-12,947	-17,947	-23,647	-24,299	-27,547	-30,947	-31,243
$\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow$ [μm]	0,747	-2,967	-7,053	-8,222	-13,053	-17,353	-18,464	-23,053	-26,353	-25,464
$\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow$ [μm]	-5,947	-10,233	-13,747	-15,378	-19,747	-25,047	-27,136	-29,747	-34,047	-34,136
$R_i \uparrow$ [μm] (2.9)	7,694	7,483	7,266	6,693	6,693	7,694	8,198	8,295	6,693	8,485
$R_i \downarrow$ [μm] (2.10)	6,693	7,266	6,693	7,155	6,693	7,694	8,672	6,693	7,694	8,672
B_i [μm] (2.4)	1,400	2,600	0,800	2,200	1,800	1,400	2,600	3,000	2,600	2,800
R_i [μm] (2.13)	8,594	9,975	7,780	9,124	8,493	9,094	11,035	10,494	9,794	11,379

PŘÍLOHA P VI: NAMĚŘENÁ DATA OSY X – LIST 2

P_i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$P_i \uparrow$ [mm]	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
$x_i 1 \uparrow$ [μm]	-23	-23	-19	-19	-20	-21	-20	-26	-25	-21
$x_i 2 \uparrow$ [μm]	-28	-27	-23	-24	-25	-25	-24	-31	-30	-26
$x_i 3 \uparrow$ [μm]	-26	-25	-21	-21	-22	-23	-22	-28	-27	-23
$x_i 4 \uparrow$ [μm]	-26	-26	-22	-23	-23	-24	-23	-29	-28	-25
$x_i 5 \uparrow$ [μm]	-28	-27	-22	-23	-24	-24	-23	-29	-29	-26
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm] (2.1)	-26,200	-25,600	-21,400	-22,000	-22,800	-23,400	-22,400	-28,600	-27,800	-24,200
$P_i \downarrow$ [mm]	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
$x_i 1 \downarrow$ [μm]	-27	-26	-23	-24	-24	-24	-24	-30	-29	-26
$x_i 2 \downarrow$ [μm]	-29	-29	-26	-26	-27	-28	-28	-34	-32	-29
$x_i 3 \downarrow$ [μm]	-26	-25	-22	-22	-23	-23	-24	-29	-28	-25
$x_i 4 \downarrow$ [μm]	-31	-30	-27	-28	-29	-30	-30	-35	-34	-31
$x_i 5 \downarrow$ [μm]	-26	-26	-22	-23	-24	-24	-24	-30	-29	-26
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm] (2.2)	-27,800	-27,200	-24,000	-24,600	-25,400	-25,800	-26,000	-31,600	-30,400	-27,400
\bar{x}_i [μm] (2.3)	-27,000	-26,400	-22,700	-23,300	-24,100	-24,600	-24,200	-30,100	-29,100	-25,800
$s_i \uparrow$ [μm] (2.7)	2,049	1,673	1,517	2,000	1,924	1,517	1,517	1,817	1,924	2,168
$s_i \downarrow$ [μm] (2.8)	2,168	2,168	2,345	2,408	2,510	3,033	2,828	2,702	2,510	2,510
$\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow$ [μm]	-22,101	-22,253	-18,367	-18,000	-18,953	-20,367	-19,367	-24,967	-23,953	-19,864
$\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow$ [μm]	-30,299	-28,947	-24,433	-26,000	-26,647	-26,433	-25,433	-32,233	-31,647	-28,536
$\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow$ [μm]	-23,464	-22,864	-19,310	-19,783	-20,380	-19,734	-20,343	-26,196	-25,380	-22,380
$\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow$ [μm]	-32,136	-31,536	-28,690	-29,417	-30,420	-31,866	-31,657	-37,004	-35,420	-32,420
$R_i \uparrow$ [μm] (2.9)	8,198	6,693	6,066	8,000	7,694	6,066	6,066	7,266	7,694	8,672
$R_i \downarrow$ [μm] (2.10)	8,672	8,672	9,381	9,633	10,040	12,133	11,314	10,807	10,040	10,040
B_i [μm] (2.4)	1,600	1,600	2,600	2,600	2,600	2,400	3,600	3,000	2,600	3,200
R_i [μm] (2.13)	10,035	9,283	10,324	11,417	11,467	12,133	12,290	12,037	11,467	12,556

PŘÍLOHA P VII: NAMĚŘENÁ DATA OSY X – LIST 3

P_i	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$P_i \uparrow$ [mm]	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
$x_i 1 \uparrow$ [μm]	-20	-16	-14	-14	-15	-12	-17	-16	-13	-9
$x_i 2 \uparrow$ [μm]	-25	-21	-20	-19	-20	-17	-22	-22	-19	-15
$x_i 3 \uparrow$ [μm]	-22	-18	-16	-16	-16	-14	-18	-18	-14	-11
$x_i 4 \uparrow$ [μm]	-23	-20	-18	-18	-19	-16	-20	-20	-17	-13
$x_i 5 \uparrow$ [μm]	-23	-20	-18	-17	-18	-15	-20	-19	-16	-12
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm] (2.1)	-22,600	-19,000	-17,200	-16,800	-17,600	-14,800	-19,400	-19,000	-15,800	-12,000
$P_i \downarrow$ [mm]	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
$x_i 1 \downarrow$ [μm]	-23	-21	-19	-18	-18	-16	-21	-20	-17	-13
$x_i 2 \downarrow$ [μm]	-27	-24	-23	-22	-23	-21	-26	-25	-22	-18
$x_i 3 \downarrow$ [μm]	-22	-20	-18	-17	-18	-15	-20	-20	-17	-12
$x_i 4 \downarrow$ [μm]	-28	-26	-24	-23	-24	-22	-26	-26	-23	-18
$x_i 5 \downarrow$ [μm]	-23	-20	-18	-19	-19	-17	-22	-21	-18	-13
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm] (2.2)	-24,600	-22,200	-20,400	-19,800	-20,400	-18,200	-23,000	-22,400	-19,400	-14,800
\bar{x}_i [μm] (2.3)	-23,600	-20,600	-18,800	-18,300	-19,000	-16,500	-21,200	-20,700	-17,600	-13,400
$s_i \uparrow$ [μm] (2.7)	1,817	2,000	2,280	1,924	2,074	1,924	1,949	2,236	2,387	2,236
$s_i \downarrow$ [μm] (2.8)	2,702	2,683	2,881	2,588	2,881	3,114	2,828	2,881	2,881	2,950
$\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow$ [μm]	-18,967	-15,000	-12,639	-12,953	-13,453	-10,953	-15,501	-14,528	-11,025	-7,528
$\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow$ [μm]	-26,233	-23,000	-21,761	-20,647	-21,747	-18,647	-23,299	-23,472	-20,575	-16,472
$\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow$ [μm]	-19,196	-16,833	-14,638	-14,623	-14,638	-11,971	-17,343	-16,638	-13,638	-8,901
$\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow$ [μm]	-30,004	-27,567	-26,162	-24,977	-26,162	-24,429	-28,657	-28,162	-25,162	-20,699
$R_i \uparrow$ [μm] (2.9)	7,266	8,000	9,121	7,694	8,295	7,694	7,797	8,944	9,550	8,944
$R_i \downarrow$ [μm] (2.10)	10,807	10,733	11,524	10,354	11,524	12,458	11,314	11,524	11,524	11,798
B_i [μm] (2.4)	2,000	3,200	3,200	3,000	2,800	3,400	3,600	3,400	3,600	2,800
R_i [μm] (2.13)	11,037	12,567	13,523	12,024	12,709	13,476	13,156	13,634	14,137	13,171

PŘÍLOHA P VIII: NAMĚŘENÁ DATA OSY X – LIST 4

P_i	31	32	33	34	35	36	37	38	39
$P_i \uparrow$ [mm]	310	320	330	340	350	360	370	380	390
$x_i 1 \uparrow$ [μm]	-11	-7	-5	-7	-3	-4	-9	-6	-2
$x_i 2 \uparrow$ [μm]	-16	-13	-10	-13	-9	-10	-15	-12	-8
$x_i 3 \uparrow$ [μm]	-12	-9	-6	-9	-4	-5	-11	-7	-3
$x_i 4 \uparrow$ [μm]	-15	-11	-9	-12	-8	-8	-14	-11	-6
$x_i 5 \uparrow$ [μm]	-13	-10	-7	-10	-5	-7	-12	-9	-4
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm] (2.1)	-13,400	-10,000	-7,400	-10,200	-5,800	-6,800	-12,200	-9,000	-4,600
$P_i \downarrow$ [mm]	310	320	330	340	350	360	370	380	390
$x_i 1 \downarrow$ [μm]	-13	-9	-8	-10	-6	-8	-11	-9	-4
$x_i 2 \downarrow$ [μm]	-18	-15	-13	-15	-12	-14	-17	-15	-9
$x_i 3 \downarrow$ [μm]	-12	-10	-8	-10	-6	-7	-11	-10	-4
$x_i 4 \downarrow$ [μm]	-19	-16	-14	-16	-13	-13	-17	-15	-10
$x_i 5 \downarrow$ [μm]	-13	-11	-9	-11	-7	-8	-13	-11	-5
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm] (2.2)	-15,000	-12,200	-10,400	-12,400	-8,800	-10,000	-13,800	-12,000	-6,400
\bar{x}_i [μm] (2.3)	-14,200	-11,100	-8,900	-11,300	-7,300	-8,400	-13,000	-10,500	-5,500
$s_i \uparrow$ [μm] (2.7)	2,074	2,236	2,074	2,387	2,588	2,387	2,387	2,550	2,408
$s_i \downarrow$ [μm] (2.8)	3,240	3,114	2,881	2,881	3,421	3,240	3,033	2,828	2,881
$\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow$ [μm]	-9,253	-5,528	-3,253	-5,425	-0,623	-2,025	-7,425	-3,901	0,217
$\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow$ [μm]	-17,547	-14,472	-11,547	-14,975	-10,977	-11,575	-16,975	-14,099	-9,417
$\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow$ [μm]	-8,519	-5,971	-4,638	-6,638	-1,959	-3,519	-7,734	-6,343	-0,638
$\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow$ [μm]	-21,481	-18,429	-16,162	-18,162	-15,641	-16,481	-19,866	-17,657	-12,162
$R_i \uparrow$ [μm] (2.9)	8,295	8,944	8,295	9,550	10,354	9,550	9,550	10,198	9,633
$R_i \downarrow$ [μm] (2.10)	12,961	12,458	11,524	11,524	13,682	12,961	12,133	11,314	11,524
B_i [μm] (2.4)	1,600	2,200	3,000	2,200	3,000	3,200	1,600	3,000	1,800
R_i [μm] (2.13)	12,961	12,901	12,909	12,737	15,018	14,456	12,441	13,756	12,379

PŘÍLOHA P IX: NAMĚŘENÁ DATA OSY Z – LIST 1

P_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_i \uparrow$ [mm]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$x_i 1 \uparrow$ [μm]	-6	-1	-1	-3	1	0	-2	2	1	0
$x_i 2 \uparrow$ [μm]	-14	-9	-10	-11	-7	-8	-10	-7	-7	-8
$x_i 3 \uparrow$ [μm]	-7	-4	-3	-5	-1	-1	-3	0	0	-1
$x_i 4 \uparrow$ [μm]	-5	0	0	-2	2	1	-1	2	2	1
$x_i 5 \uparrow$ [μm]	-12	-8	-8	-10	-6	-7	-8	-6	-6	-7
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm] (2.1)	-8,800	-4,400	-4,400	-6,200	-2,200	-3,000	-4,800	-1,800	-2,000	-3,000
$P_i \downarrow$ [mm]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$x_i 1 \downarrow$ [μm]	-11	-6	-6	-8	-4	-4	-6	-2	-2	-3
$x_i 2 \downarrow$ [μm]	-6	-3	-2	-4	-1	-1	-3	0	1	-1
$x_i 3 \downarrow$ [μm]	-2	2	2	1	5	4	2	6	6	5
$x_i 4 \downarrow$ [μm]	-10	-5	-5	-7	-3	-3	-5	-2	-1	-2
$x_i 5 \downarrow$ [μm]	-9	-5	-4	-7	-3	-3	-5	-2	-1	-2
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm] (2.2)	-7,600	-3,400	-3,000	-5,000	-1,200	-1,400	-3,400	0,000	0,600	-0,600
\bar{x}_i [μm] (2.3)	-8,200	-3,900	-3,700	-5,600	-1,700	-2,200	-4,100	-0,900	-0,700	-1,800
$s_i \uparrow$ [μm] (2.7)	3,962	4,037	4,393	4,087	4,087	4,183	3,962	4,382	4,183	4,183
$s_i \downarrow$ [μm] (2.8)	3,647	3,209	3,162	3,674	3,633	3,209	3,209	3,464	3,209	3,209
$\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow$ [μm]	-0,875	3,675	4,386	1,973	5,973	5,367	3,125	6,964	6,367	5,367
$\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow$ [μm]	-16,725	-12,475	-13,186	-14,373	-10,373	-11,367	-12,725	-10,564	-10,367	-11,367
$\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow$ [μm]	-0,306	3,019	3,325	2,348	6,066	5,019	3,019	6,928	7,019	5,819
$\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow$ [μm]	-14,894	-9,819	-9,325	-12,348	-8,466	-7,819	-9,819	-6,928	-5,819	-7,019
$R_i \uparrow$ [μm] (2.9)	15,849	16,149	17,573	16,346	16,346	16,733	15,849	17,527	16,733	16,733
$R_i \downarrow$ [μm] (2.10)	14,588	12,837	12,649	14,697	14,533	12,837	12,837	13,856	12,837	12,837
B_i [μm] (2.4)	-1,200	-1,000	-1,400	-1,200	-1,000	-1,600	-1,400	-1,800	-2,600	-2,400
R_i [μm] (2.13)	16,418	16,149	17,573	16,722	16,439	16,733	15,849	17,527	17,385	17,185

PŘÍLOHA P X: NAMĚŘENÁ DATA OSY Z – LIST 2

P_i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$P_i \uparrow$ [mm]	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$x_i 1 \uparrow$ [μm]	4	3	3	6	5	6	8	5	8	9
$x_i 2 \uparrow$ [μm]	-5	-5	-5	-2	-4	-2	0	-2	1	2
$x_i 3 \uparrow$ [μm]	3	2	3	5	4	6	8	6	9	10
$x_i 4 \uparrow$ [μm]	5	4	4	7	5	8	9	7	10	11
$x_i 5 \uparrow$ [μm]	-4	-4	-4	-1	-3	-1	1	-2	1	3
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm] (2.1)	0,600	0,000	0,200	3,000	1,400	3,400	5,200	2,800	5,800	7,000
$P_i \downarrow$ [mm]	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$x_i 1 \downarrow$ [μm]	0	-1	1	3	1	4	6	3	6	7
$x_i 2 \downarrow$ [μm]	2	2	2	5	3	5	7	4	7	8
$x_i 3 \downarrow$ [μm]	8	7	8	10	9	11	13	10	13	14
$x_i 4 \downarrow$ [μm]	1	0	1	4	2	5	6	4	7	8
$x_i 5 \downarrow$ [μm]	0	-1	0	3	0	3	5	2	5	6
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm] (2.2)	2,200	1,400	2,400	5,000	3,000	5,600	7,400	4,600	7,600	8,600
\bar{x}_i [μm] (2.3)	1,400	0,700	1,300	4,000	2,200	4,500	6,300	3,700	6,700	7,800
$s_i \uparrow$ [μm] (2.7)	4,722	4,183	4,324	4,183	4,506	4,561	4,324	4,438	4,438	4,183
$s_i \downarrow$ [μm] (2.8)	3,347	3,362	3,209	2,915	3,536	3,130	3,209	3,130	3,130	3,130
$\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow$ [μm]	10,045	8,367	8,849	11,367	10,411	12,521	13,849	11,677	14,677	15,367
$\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow$ [μm]	-8,845	-8,367	-8,449	-5,367	-7,611	-5,721	-3,449	-6,077	-3,077	-1,367
$\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow$ [μm]	8,893	8,123	8,819	10,831	10,071	11,861	13,819	10,861	13,861	14,861
$\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow$ [μm]	-4,493	-5,323	-4,019	-0,831	-4,071	-0,661	0,981	-1,661	1,339	2,339
$R_i \uparrow$ [μm] (2.9)	18,889	16,733	17,297	16,733	18,022	18,243	17,297	17,754	17,754	16,733
$R_i \downarrow$ [μm] (2.10)	13,387	13,446	12,837	11,662	14,142	12,522	12,837	12,522	12,522	12,522
B_i [μm] (2.4)	-1,600	-1,400	-2,200	-2,000	-1,600	-2,200	-2,200	-1,800	-1,800	-1,600
R_i [μm] (2.13)	18,889	16,733	17,297	16,733	18,022	18,243	17,297	17,754	17,754	16,733

PŘÍLOHA P XI: NAMĚŘENÁ DATA OSY Z – LIST 3

P_i	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$P_i \uparrow$ [mm]	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
$x_i 1 \uparrow$ [μm]	6	11	11	8	12	12	9	13	13	11
$x_i 2 \uparrow$ [μm]	0	3	5	1	5	5	2	6	6	5
$x_i 3 \uparrow$ [μm]	8	12	13	10	14	14	11	15	15	13
$x_i 4 \uparrow$ [μm]	9	12	14	10	14	13	10	15	15	12
$x_i 5 \uparrow$ [μm]	1	4	5	1	6	5	2	7	6	4
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm] (2.1)	4,800	8,400	9,600	6,000	10,200	9,800	6,800	11,200	11,000	9,000
$P_i \downarrow$ [mm]	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
$x_i 1 \downarrow$ [μm]	5	9	10	7	11	11	8	13	12	11
$x_i 2 \downarrow$ [μm]	5	9	10	6	10	11	8	12	11	9
$x_i 3 \downarrow$ [μm]	12	16	16	13	17	17	14	18	18	16
$x_i 4 \downarrow$ [μm]	6	10	11	7	12	12	8	13	13	11
$x_i 5 \downarrow$ [μm]	3	7	8	2	7	7	3	8	8	5
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm] (2.2)	6,200	10,200	11,000	7,000	11,400	11,600	8,200	12,800	12,400	10,400
\bar{x}_i [μm] (2.3)	5,500	9,300	10,300	6,500	10,800	10,700	7,500	12,000	11,700	9,700
$s_i \uparrow$ [μm] (2.7)	4,087	4,506	4,336	4,637	4,382	4,438	4,438	4,382	4,637	4,183
$s_i \downarrow$ [μm] (2.8)	3,421	3,421	3,000	3,937	3,647	3,578	3,899	3,564	3,647	3,975
$\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow$ [μm]	12,973	17,411	18,272	15,274	18,964	18,677	15,677	19,964	20,274	17,367
$\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow$ [μm]	-3,373	-0,611	0,928	-3,274	1,436	0,923	-2,077	2,436	1,726	0,633
$\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow$ [μm]	13,041	17,041	17,000	14,874	18,694	18,755	15,997	19,927	19,694	18,350
$\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow$ [μm]	-0,641	3,359	5,000	-0,874	4,106	4,445	0,403	5,673	5,106	2,450
$R_i \uparrow$ [μm] (2.9)	16,346	18,022	17,344	18,547	17,527	17,754	17,754	17,527	18,547	16,733
$R_i \downarrow$ [μm] (2.10)	13,682	13,682	12,000	15,748	14,588	14,311	15,595	14,255	14,588	15,900
B_i [μm] (2.4)	-1,400	-1,800	-1,400	-1,000	-1,200	-1,800	-1,400	-1,600	-1,400	-1,400
R_i [μm] (2.13)	16,414	18,022	17,344	18,547	17,527	17,832	18,074	17,527	18,547	17,716

PŘÍLOHA P XII: NAMĚŘENÁ DATA OSY Z – LIST 4

P_i	31	32	33	34	35	36	37	38
$P_i \uparrow$ [mm]	155	160	165	170	175	180	185	190
$x_i 1 \uparrow$ [μm]	15	14	13	17	16	17	20	17
$x_i 2 \uparrow$ [μm]	9	7	8	11	10	11	14	11
$x_i 3 \uparrow$ [μm]	17	17	16	20	19	20	23	20
$x_i 4 \uparrow$ [μm]	17	16	15	19	17	19	22	19
$x_i 5 \uparrow$ [μm]	8	7	7	11	9	11	14	11
$\bar{x}_i \uparrow$ [μm] (2.1)	13,200	12,200	11,800	15,600	14,200	15,600	18,600	15,600
$P_i \downarrow$ [mm]	155	160	165	170	175	180	185	190
$x_i 1 \downarrow$ [μm]	15	14	15	18	17	18	21	19
$x_i 2 \downarrow$ [μm]	13	13	12	16	15	16	19	16
$x_i 3 \downarrow$ [μm]	20	19	19	22	22	23	25	22
$x_i 4 \downarrow$ [μm]	15	15	16	19	17	19	21	19
$x_i 5 \downarrow$ [μm]	10	9	9	13	11	13	16	12
$\bar{x}_i \downarrow$ [μm] (2.2)	14,600	14,000	14,200	17,600	16,400	17,800	20,400	17,600
\bar{x}_i [μm] (2.3)	13,900	13,100	13,000	16,600	15,300	16,700	19,500	16,600
$s_i \uparrow$ [μm] (2.7)	4,382	4,868	4,087	4,336	4,438	4,336	4,336	4,336
$s_i \downarrow$ [μm] (2.8)	3,647	3,606	3,834	3,362	3,975	3,701	3,286	3,782
$\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow$ [μm]	21,964	21,937	19,973	24,272	23,077	24,272	27,272	24,272
$\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow$ [μm]	4,436	2,463	3,627	6,928	5,323	6,928	9,928	6,928
$\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow$ [μm]	21,894	21,211	21,868	24,323	24,350	25,203	26,973	25,163
$\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow$ [μm]	7,306	6,789	6,532	10,877	8,450	10,397	13,827	10,037
$R_i \uparrow$ [μm] (2.9)	17,527	19,473	16,346	17,344	17,754	17,344	17,344	17,344
$R_i \downarrow$ [μm] (2.10)	14,588	14,422	15,336	13,446	15,900	14,805	13,145	15,126
B_i [μm] (2.4)	-1,400	-1,800	-2,400	-2,000	-2,200	-2,200	-1,800	-2,000
R_i [μm] (2.13)	17,527	19,473	18,241	17,395	19,027	18,274	17,344	18,235