



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

TESTOVÁNÍ TECHNOLOGIE ON-THE-FLY PŘÍSTROJEM LASERTRACER

TESTING TECHNOLOGY ON-THE-FLY INSTRUMENT LASERTRACER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Vala

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Michal Vala
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

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

Testování technologie on–the–fly přístrojem LaserTRACER

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

S nasazováním pokročilých technologií na CNC obráběcí stroje roste i čas pro zavádění těchto korekcí do stroje. Jednou z možností, jak dosáhnout kvalitnějších výsledků a snížení nákladů spojených s odstávkou stroje je přímé propojení měřicího zařízení a CNC obráběcího stroje. Jedním z pokročilých způsobů je u přístroje LaserTRACER využít technologie On–the–Fly. Pro tento způsob měření je nutné systematicky připravit propojení jak na straně řídicího systému stroje, tak na straně LaserTRACERu. Obsahem diplomové práce bude mimo jiné také připravit tuto komunikaci, na jejímž základě budou provedena měření volumetrické přesnosti s cílem porovnat výsledky s konvenčními metodami měření LaserTRACEREM.

Cíle diplomové práce:

1. Návrh a realizace propojení CNC obráběcího stroje s LaserTRACEREM.
2. Zpracování a vyhodnocení naměřených dat.
3. Posouzení vhodnosti nasazení technologie on–the–fly na obráběcích strojích.

Seznam doporučené literatury:

Borský, Václav. Základy stavby obráběcích strojů. 1. vyd. [s.l.] : [s.n.], 1986. 145 s. ISBN 55-600-86.

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.

WECK, Manfred. Werkzeugmaschinen. 8. neu bearb. Aufl. Berlin: Springer, 2006. ISBN 3-540-225-2-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce popisuje realizaci a testování technologie on-the-fly pomocí samonaváděcího interferometru. Touto metodou je možné uskutečnit měření s větším množstvím měřených bodů a snížení času kalibrace obráběcího stroje. Naměřené kalibrační a verifikační hodnoty parametrů stroje, časy a další údaje této metody jsou srovnávány s výsledky konvenční metody trigger. Ke zhodnocení kvality volumetrických kompenzací vytvořených z kalibračních hodnot je využito verifikačního testu kruhové interpolace.

ABSTRACT

This diploma thesis describes realization and testing on-the-fly measurement using tracking interferometer. This measurement enables to achieve higher amount of measured points and decrease time of machine tool calibration. Calibration and verification values of machine parameters, as well as time of measurement and other details of this method are compared with results of conventional method called trigger. To evaluate the quality of volumetric compensation created from calibration values, we use verification measurement of circular interpolation.

KLÍČOVÁ SLOVA

Obráběcí stroj, kompenzace, geometrická přesnost, volumetrická přesnost, samonaváděcí interferometr, on-the-fly.

KEYWORDS

Machine tool, compensation, geometric accuracy, volumetric accuracy, tracking interferometer, on-the-fly.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VALA,M. *Testování technologie on-the-fly přístrojem LaserTRACER*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2016, 97 s., Vedoucí diplomové práce Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce vznikla za podpory a na přístrojovém vybavení NETME Centre, regionálního výzkumného a vývojového centra vybudovaného z finančních prostředků OP VaVpI v rámci projektu NETME Centre (Nové technologie pro strojírenství), Reg. č.: CZ.1.05/2.1.00/01.0002 a podporovaného v navazující fázi udržitelnosti prostřednictvím projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančního přispění MŠMT v rámci účelové podpory programu NPU I.

Tímto děkuji vedoucímu, Ing., Dipl.-Ing Michalovi Holubovi, Ph.D. za ochotu, vstřícný přístup, příkladné vedení a všechny čas, který věnoval této diplomové práci. Dále bych rád poděkovat Ing. Janovi Vetiškovi, Ph.D. za pomoc při propojování systémů a následnou konzultaci.

ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing., Dipl.-Ing Michala Holuba, Ph.D a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25.5.2017

.....

Vala Michal

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	GEOMETRICKÉ CHYBY OBRÁBĚCÍCH STROJŮ	17
3	VOLUMETRICKÁ CHYBA A PŘESNOST	19
4	MĚŘENÍ VOLUMETRICKÉ PŘESNOSTI	21
4.1	Ballbar [4, 5]	21
4.1.1	Testování	21
4.1.2	Shrnutí	22
4.2	Laser Interferometr	22
4.2.1	Princip funkce interferometru k měření délek	22
4.2.2	Leser Interferometer XL – Renishaw [5, 9]	23
4.2.3	Shrnutí	25
4.3	LaserTRACER [5, 10]	25
4.3.1	Metody snímání	26
4.3.2	Shrnutí	28
5	NÁVRH A REALIZACE PROPOJENÍ SYSTÉMŮ	29
6	SW TRAC-CAL	33
6.1	Prostředí Trac-cal – Plan.....	33
6.1.1	Settings	33
6.1.2	Select model	34
6.1.3	Configure	34
6.2	Measure.....	39
6.2.1	Connection.....	39
6.2.2	Carry out measurement	40
6.3	Evaluate	40
6.3.1	Show results.....	41
7	VYHODNOCENÍ-TRIGGER	43
7.1	Kalibrační měření	43
7.1.1	LTc.....	43
7.1.2	Ballbar	44
7.2	Verifikační měření	46
7.2.1	LTc.....	46
7.2.2	Ballbar	47
7.3	Porovnání kalibrace s verifikací – trigger	49
7.3.1	LTc.....	49
7.3.2	Ballbar	57
8	VYHODNOCENÍ ON-THE-FLY	59
8.1	Kalibrační měření	59
8.1.1	LTc.....	59
8.1.2	Ballbar	60
8.2	Verifikační měření	61
8.2.1	LTc.....	61
8.2.2	Ballbar	62
8.3	Porovnání kalibrace s verifikací – on-the-fly	63
8.3.1	LTc.....	63

8.3.2	Ballbar	71
9	VÝSLEDNÉ POROVNÁNÍ ON-THE-FLY A TRIGGER	73
9.1	Porovnání průběhů a hodnot kalibrací	73
9.2	Porovnání hodnot verifikací	81
9.3	Porovnání histogramů residuí	83
9.4	Porovnání nejistot	86
9.5	Porovnání časů	87
10	ZÁVĚR.....	89
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	91
12	SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ	93
12.1	Seznam tabulek.....	93
12.2	Seznam obrázků.....	94

1 ÚVOD

Požadavky na obráběcí stroje jsou vyšší než kdy dřív. Roste důraz na parametry jako je univerzálnost, produktivita, výkon, přesnost, ekologie a pořizovací cena. Od moderních strojů je požadováno, aby byly schopny hrubování s co největším průměrem třísky, jako i dostatečně přesných dokončovacích operací. Tato jakási univerzálnost, ve které jdou vlastnosti proti sobě, se zdá být klíčová. V dnešní době vyspělosti výkonové a nástrojové techniky jsme již schopni extrémně produktivního hrubování. Taktéž ale roste požadavek na geometrickou a zejména výslednou výrobní přesnost. Co tedy můžeme udělat pro zlepšení přesnosti dokončovacích operací? O přesnosti stroje se rozhoduje už ve výrobě, kde je možné přesným obráběním, zaškrabáváním a precizní montáží markantně ovlivnit výslednou přesnost stroje. Druhou možností jsou softwarové kompenzace. Ty se již tradičně používají při kalibraci stroje při ustavení a po havárii. Zde mluvíme zejména o základních kalibracích polohování a průhybu. Nejmodernější technologií samonaváděcích interferometrů jsme však schopni odhalit většinu geometrických chyb stroje a úspěšně je kompenzovat takzvanými volumetrickými kompenzacemi.

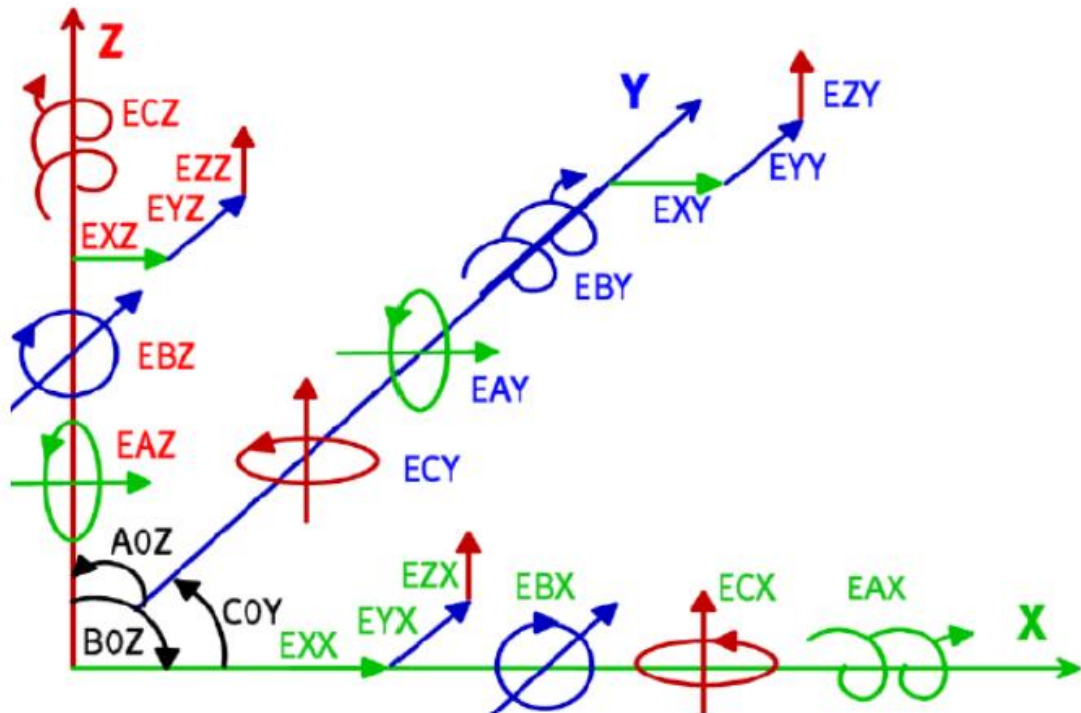
Jakákoli kalibrace obráběcích strojů je časově velmi náročná, což není v souladu s požadovanou produktivitou majitele stroje. Proto se ze strany výrobce těchto samonaváděcích interferometrických zařízení setkáváme se snahou tento čas zkracovat. To se nejdříve podařilo pomocí metody trigger, kterou je možno po propojení systému obráběcího stroje a měřicího zařízení redukovat dobu zastavení pro změření bodu v prostoru. Další, pokročilejší možností je neměřit body ležící na přímce, ale kontinuálně celou přímkou. Tato metoda se jmenuje on-the-fly a vyžaduje ještě důkladnější propojení obou systémů.

Při kalibraci strojů se setkávají tři proměnné, a to čas odstavení, čas měření a kvalita výsledků měření. Čas odstavení stroje jakož to doba, po kterou zákazník nemůže produkovat. Čas měření, doba, kdy jsou okolní podmínky ovlivňující interferometrické měření proměnné. Oba časy jsou samozřejmě v přímé úměře, avšak není jasné, v jaké úměře je k nim třetí veličina, tedy kvalita výsledků. Zkrácením doby bychom měli minimalizovat vliv okolních podmínek, avšak bez možnosti ustálení paprsku při kontinuálním měření on-the-fly může docházet k nepřesnostem. A bude-li k těmto nepřesnostem docházet, bude hodnota nepřesnosti adekvátní ušetřenému strojnímu času?

Mým cílem v této práci je tuto u nás relativně nezkoušenou metodu on-the-fly aplikovat na malé vertikální obráběcí centrum, porovnat ji s konvenční metodou trigger a posoudit vhodnost jejího budoucího využití v průmyslu.

2 GEOMETRICKÉ CHYBY OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

Existují tři druhy geometrických chyb lineárních a rotačních os obráběcích strojů, a to chyby uhlové (yaw, pitch a roll), polohové a chyby přímosti. Na každé jednotlivé ose stroje můžeme identifikovat 6 různých chyb, a to tři translační a tři uhlové. Celkově je tedy možné se na tříosém stroji setkat s 18 chybami a dalšími třemi chybami vzájemné kolmosti jednotlivých os. Na obrázku (Obr. 1) jsou tyto chyby zaznačeny dle konvence normy ISO 230-1.[1]

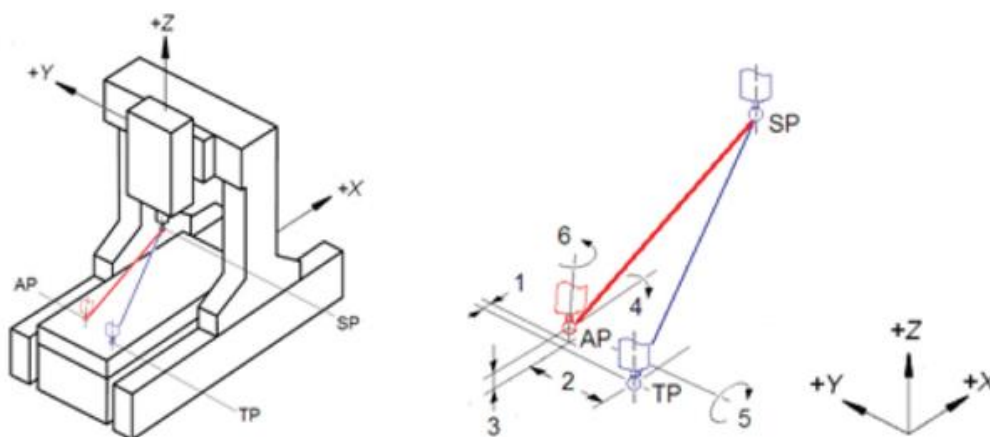


Obr. 1) Nákres 21 parametrů tříosého stroje [2]

EXX	Přesnost najetí do polohy v ose X.	ECX	Natáčení v ose X, kolem osy Z.
EYY	Přesnost najetí do polohy v ose Y.	EAY	Klopení v ose Y, kolem osy X.
EZZ	Přesnost najetí do polohy v ose Z.	EBY	Naklápění v ose Y, kolem osy Y.
EYX	Odchylka přímosti osy Y ve směru X.	ECY	Natáčení v ose Y, kolem osy Z.
EZX	Odchylka přímosti osy Z ve směru X.	EAZ	Klopení v ose Z, kolem osy X.
EXY	Odchylka přímosti osy X ve směru Y.	EBZ	Natáčení v ose Z, kolem osy Y.
EZY	Odchylka přímosti osy Z ve směru Y.	ECZ	Naklápění v ose Z, kolem osy Z.
EYZ	Odchylka přímosti osy Y ve směru Z.	A0Z	Kolmost v rovině YZ.
EAX	Naklápění v ose X, kolem osy X.	B0Z	Kolmost v rovině XZ.
EBX	Klopení v ose X, kolem osy Y.	C0Y	Kolmost v rovině XY.

3 VOLUMETRICKÁ CHYBA A PŘESNOST

Volumetrická přesnost je definovaná jako schopnost stroje vyrábět přesné tři rozměrné součásti. Volumetrická chyba (Obr. 2) je vektor mezi skutečnou pozicí (AP) a teoretickou pozicí (TP) ve zvoleném souřadnicovém systému. Výsledné odchylky jsme schopni získat sečtením chybových parametrů stroje uvedené v kapitole 2, přičemž rozsah těchto odchylek je právě hodnota volumetrické chyby. [7]



Obr. 2) Volumetrická chyba jakož to vektor mezi skutečnou polohou (AP) a teoretickou polohou (TP) [2]

Norma ISO 230-1 [2] definuje volumetrickou přesnost V_{XYZ} jako:

„Maximální rozsah relativních úchylek mezi skutečnou a ideální polohou ve směru os X , Y a Z a maximální rozsah orientace úchylek pro směry os A , B a C pro pohyby v osách X , Y a Z v určeném objemu, kde odchylky jsou relativními odchylkami mezi stranou nástroje a stranou obrobku obráběcího stroje pro specifikované vyrovnání primárních a sekundárních os“

Tedy volumetrickou přesnost definuje vztah [7]:

$$V_{xyz} = \sqrt{(\max Dx(x, y, z) - \min Dx(x, y, z))^2 + (\max Dy(x, y, z) - \min Dy(x, y, z))^2 + (\max Dz(x, y, z) - \min Dz(x, y, z))^2} \quad (1)$$

Kde chyba ve směru každé osy je:

$$Dx(x, y, z) = Dx(x) + Dx(y) + Dy(z) \quad (2)$$

$$Dy(x, y, z) = Dy(x) + Dy(y) + Dy(z) \quad (3)$$

$$Dz(x, y, z) = Dz(x) + Dz(y) + Dz(z) \quad (4)$$

Pro objemovou přesnost se používá šest parametrů, jeden pro každý translační a rotační rozsah úchylek:

$V_{XYZ, X}$ Maximální rozsah úchylek vztahujících se k ose X .

$V_{XYZ, Y}$ Maximální rozsah úchylek vztahujících se k ose Y .

$V_{XYZ, Z}$ Maximální rozsah úchylek vztahujících se k ose Z .

$V_{XYZ, A}$	Maximální rozsah úchylek ve směru osy A.
$V_{XYZ, B}$	Maximální rozsah úchylek ve směru osy B.
$V_{XYZ, C}$	Maximální rozsah úchylek ve směru osy C.

Volumetrickou přesnost stroje popisuje i norma ISO 230-6 [3]:

„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.“

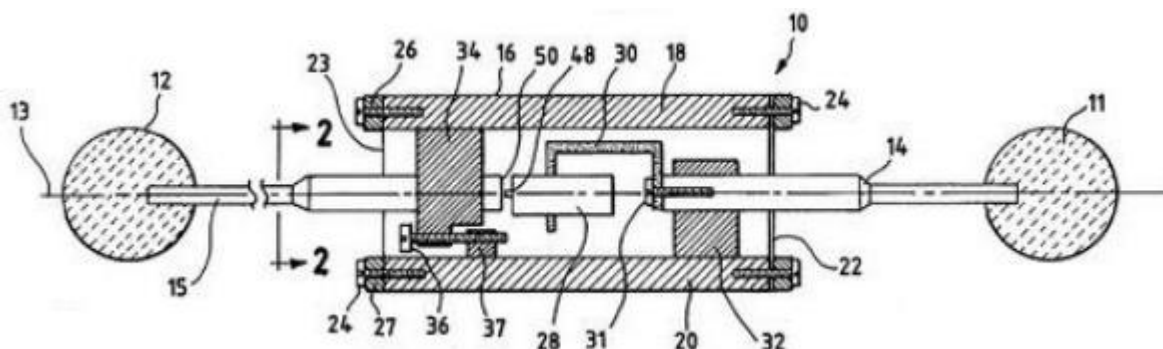
4 MĚŘENÍ VOLUMETRICKÉ PŘESNOSTI

Pro měření přesnosti obráběcích strojů existuje velká řada zařízení a postupů, avšak ne všechny jsou schopny měřit právě volumetrickou přesnost. V následujících kapitolách je stručný popis zlomku těchto zařízení, z nichž dvě využijeme v praktické části naší práce.

4.1 Ballbar [4, 5]

Ballbar je měřicí systém společnosti Renishaw. Systém se skládá ze samotného Ballbaru, což je lineární snímač s přesnými koulemi na obou koncích, které jsou magneticky vedeny v důlcích držáků. Jeden držák je připevněn ke stolu a druhý je vložen do vřetena stroje. Stroj opisuje kružnici a je měřena změna poloměru při otáčení Ballbaru kolem pevného bodu. Data jsou pomocí bluetooth posílány do PC, kde jsou vyhodnocovány softwarem.

Princip je znázorněn na následujícím schématu (Obr. 3), kde je patrné, že snímač (28) je pevně spojen s jednou tyčinkou s koulí (14 a 11), avšak druhá tyčinka s koulí (15 a 12) je ve své ose volná a opatřená dorazy (36 a 37). Přesný senzor (28) tedy snímá změnu vzdálenosti mezi bodem 50 a 48.



Obr. 3) Schéma Ballbaru [6]

4.1.1 Testování

Běžné testování probíhá ve třech rovinách s možností měřit neúplný oblouk o uhlové délce 220°, díky čemuž lze testovat všechny 3 roviny bez přemísťování středového upínače. U testování velkých strojů, u kterých je to možné, je vhodné používat prodlužovací nástavce. Tím lze základní velikost Ballbaru 100 mm zvětšit na poloměry 150, 250, 300, 400, 450, 550, 600 mm. A s kombinací nástavců až do poloměru 1350 mm. Lze také pořídit speciální soupravu pro malé poloměry s jejichž pomocí je poloměr zmenšen na 50 mm. Ta je vhodná pro stroje s krátkou drahou os nebo pro zvýraznění dynamických chyb servopohonů stroje, na které jsou při kratších poloměrech kladeny vyšší nároky na zrychlení a zpomalení posuvů. Pro testování CNC soustruhů je nutno použít speciální soupravu, s níž je možno provádět test Ballbar 360° s poloměrem 100 mm. Současní sestavy je rameno s magnetickou miskou pro připojení k revolverové hlavě a nástavec do vřetena také s magnetickou miskou. Pro toto měření musí soustruh splňovat následující požadavky:

- Rozsah os: Osa X: 220 mm od středové linie
- Osa Z: 330 mm od sklíčidla

- Průměr vřetena: 25 mm (u jiných průměrů bude vyžadován přídatný magnetický držák)
- Držák nástrojů: pro nástroje 20 mm nebo 25 mm

Nejzajímavější částí je však software, ten je schopen vyhodnocení dat podle mezinárodních standardů (ISO 230-4 a ASME B5.54) nebo vlastní analýzy Renishaw. Tato analýza je schopna na základě výsledků posoudit vliv jednotlivých parametrů na výslednou kruhovitost. A to díky typickým tvarům, posunutím, symetriím a jiných.

Použitím dalšího softwaru, Ballbar Trace, je možno využít Ballbar k měření podle normy ISO 10791-6. Výsledkem jsou data změřená z komplexních pohybů stroje za stálého dodržování vzdálenosti mezi magnetickými miskami, ty popisují přesnosti interpolace stroje ve třech osách kartézských a dvou rotačních.

4.1.2 Shrnutí

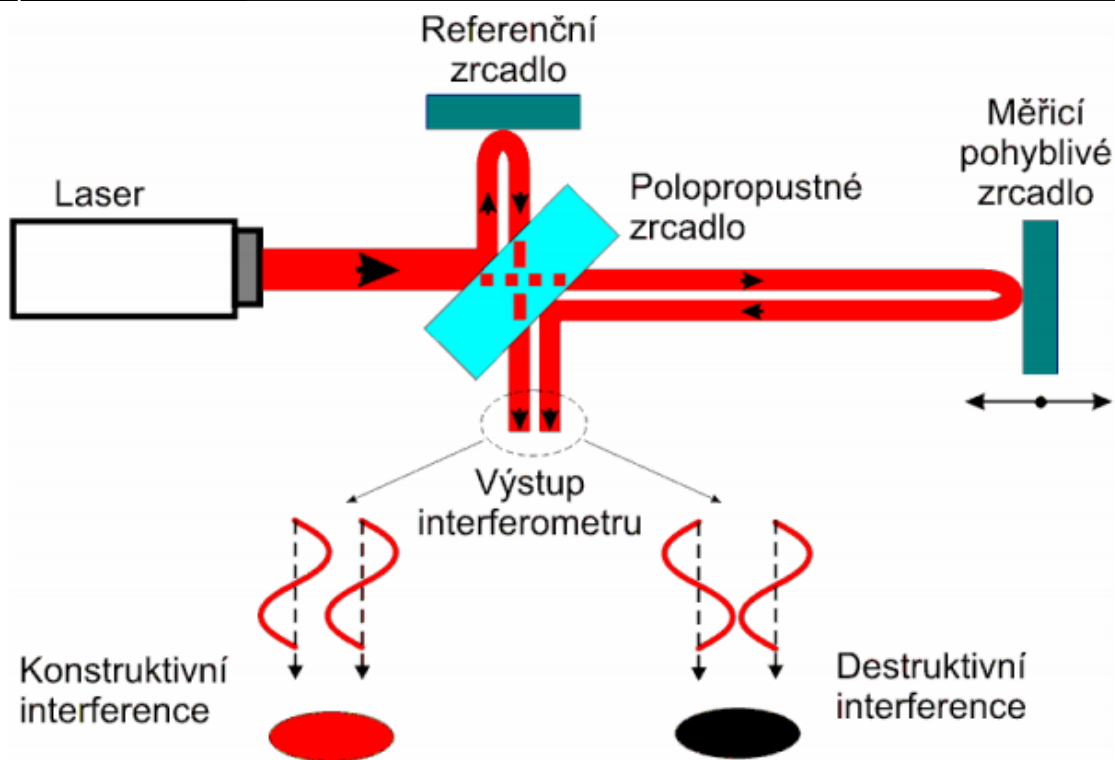
Ballbar slouží pouze ke kontrole a diagnostice stroje, výsledkem tedy nejsou kompenzační hodnoty. Zřízení nelze využít k vytvoření vektorové mapy volumetrických chyb, avšak výsledky testu kruhovitosti jsou závislé na volumetrické přesnosti stroje v místě měření. Proto je možné Ballbar využít pro rychlou kontrolu po aplikaci volumetrických kompenzací. V praktické části ho využijeme jako referenční měřidlo, srovnávající výsledky kvality kompenzací.

4.2 Laser Interferometr

Obecně je interferometr přístroj pro přesná měření na principu interference světla, ke které dochází, pokud ve stejném prostoru a čase jsou dvě a více optických vln. Výsledná optická vlna je součtem těchto vln. Interferometry lze využít k určení indexů lomu plynů a kapalin, jako i k určení jemných struktur spektrálních čar, ale hlavně, vzhledem k naší problematice, k měření délek. [8]

4.2.1 Princip funkce interferometru k měření délek

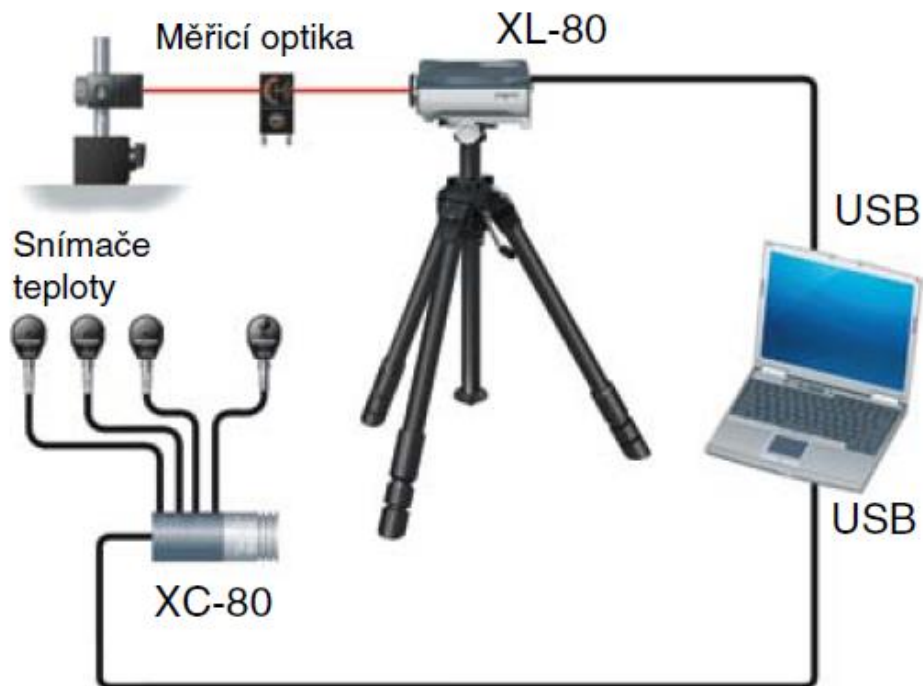
Princip je znázorněn na obrázku (Obr. 4). Laser je zdrojem světelného paprsku o známé vlnové délce. Na polopropustném zrcadle je paprsek rozdělen na dva. První paprsek je odražen referenčním zrcadlem zpět na polopropustné zrcadlo a do detektoru, druhý paprsek je odražen od pohyblivého zrcadla a vede zpět na polopropustné zrcadlo a také do detektoru, kde oba paprsky interferují. Pokud vzdálenosti referenčního a pohyblivého zrcátka jsou stejné, tak i amplitudy jsou shodné s původním paprskem. Pokud jsou amplitudy navzájem posunuté, vzdálenosti se nerovnají. V závislosti na tomto posunutí lze měřit rozdíl vzdáleností zrcadel od polopropustného zrcadla. [8]



Obr. 4) Princip laserového interferometru [8]

4.2.2 Laser Interferometer XL – Renishaw [5, 9]

Samotná sada (Obr. 5) Laser Interferometer XL80 od firmy Renishaw takovýto laserový interferometr o jmenovité vlnové délce 0,633 μm obsahuje. Paprsek má velmi stabilní frekvenci. Sadu lze používat v širokém rozsahu podmínek prostředí, tj. při tlaku 65 kPa a 115kPa, teplotě 0 $^{\circ}\text{C}$ až 40 $^{\circ}\text{C}$, maximální rychlosti posuvu 4 m/s a dosahu až 80 m s přesností $\pm 0,5 \mu\text{m/m}$. Sada obsahuje také kompenzátor XC-80 a senzorku, díky kterým zařízení nabízí široký rozsah podmínek využití. Prochází-li totiž paprsek prostředím o různém indexu lomu, jeho vlnová délka mění se dle rovnice $\lambda_1 = n \cdot \lambda_2$. Index lomu vzduchu je závislý především na teplotě, tlaku a mírně i na vlhkosti. Všechny tyto veličiny jsou v reálném čase kompenzovány, čímž je zaručena přesnost měření.



Obr. 5) Vybavení Leser Interferometru Renishaw [9]

System XL-80 obsahuje sadu optiky a zrcadel (Obr. 6). Jejich kombinací získáme možnost celé řady lineárních i uhlových měření. Také pomocí speciální soupravy RX10 lze měřit a kalibrovat polohování rotačních os s přesností $\pm 0'1''$.



Obr. 6) Sada optiky a zrcadel [9]

4.2.3 Shrnutí

Výsledkem měření je tabulka odchylek, ze které lze vytvořit kompenzační tabulky pro všechny hlavní řídicí systémy obráběcích strojů. Pomocí tohoto konvenčního interferometru je teoreticky možné měřit volumetrickou přesnost stroje, ale je to časově velmi náročné. Přestože interferometry bez automatického navádění nejsou vhodně pro měření volumetrické přesnosti stroje, jedná se o jeden z nejrozšířenějších způsobů kontroly a kompenzace obráběcích strojů. V naší praktické části s ním pracovat nebudeme, avšak považovali jsme za důležité jej zmínit.

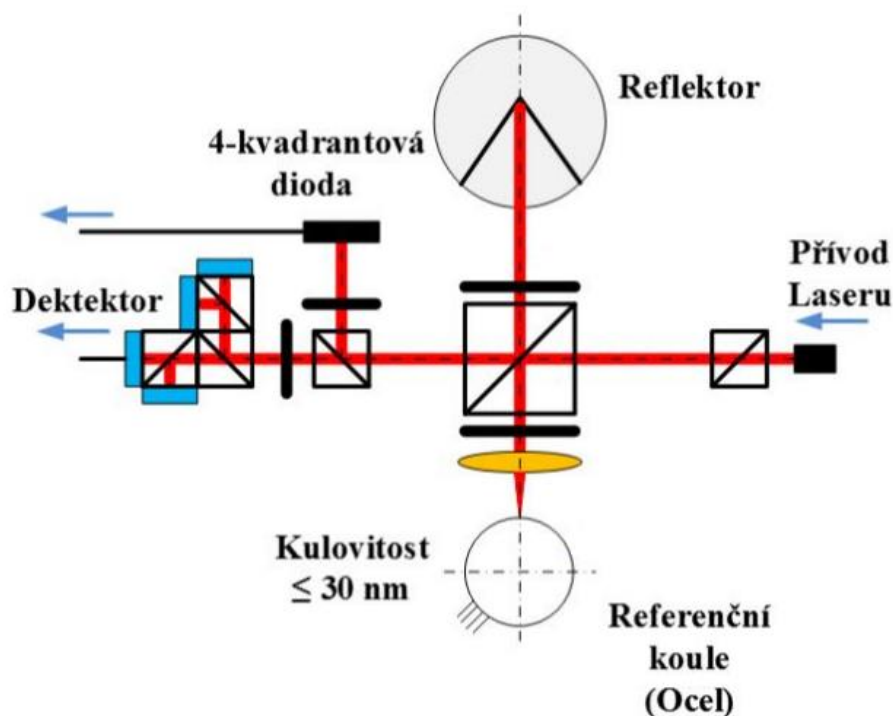
4.3 LaserTRACER [5, 10]

LeserTracer (dále LTc) společnosti Etalon je samonaváděcí interferometrické měřicí zařízení sloužící k měření a kalibraci obráběcích a souřadnicových strojů. Pracuje na dvou principech, a to na sekvenční multilateraci a interferometrickém měření délek, které jsme již podrobněji popsali v kapitole 4.2.1. Sekvenční multilaterace je běžně používaný princip například u určování polohy letadel. V GPS systémech se využívá trilaterace. V praxi to znamená, že měření musíme provést z více míst (4-6) a to z toho důvodu, že LTc měří pouze vzdálenosti a k definování bodu v prostoru jsou potřeba minimálně 4 vzdálenosti. K samonavádění se využívá čtyř-kvadrantová dioda. Technické údaje jsou znázorněny v tabulce (Tab 1).

Tab 1) Technické údaje LTc

Nejistoty měření v prostoru (95%):	0,2 μm + 0,3 $\mu\text{m}/\text{m}$
Rozlišení:	0,001 μm
Rozsah měření:	0,2–15 m
Úhlový rozsah osy azimutu:	-200° až 200°
Úhlový rozsah elevační osy:	-18° až 85°
Hmotnost:	12 kg

Na obrázku (Obr. 7) je znázorněna hlava LTc. Laserový paprsek je veden na reflektor a na referenční přesnou kouli. Z pohyblivého reflektoru umístěného ve vřetení stroje se paprsek vrací do hlavy, kde je odražen jak na detektor pro měření vzdálenosti i na čtyř-kvadrantovou diodu pro zajištění sledování odražeče.



Obr. 7) Schéma LTc [5]

Sada LTc obsahuje kromě měřicí hlavy i zdroj laseru s řídicí jednotkou, sadu teplotních snímačů pro zachování přesnosti měření ve velkém rozsahu podmínek a naklápěcí stativ pro polohování laseru. Neodmyslitelnou součástí je softwarové vybavení Trac-cal a Trac-check. Pomocí softwaru Trac-check je možné vytvořit analýzu dat dle standardizovaných norem ISO 230-2, ISO 230-4 a ISO 230-6. Za zmínku stojí, že u testu kruhovitosti (tj. ISO 230-4) je poloměr omezený pouze rozsahem laseru. Trac-cal, se kterým se seznámíme v kapitole č. 5, je softwarem pro měření volumetrické přesnosti a tvorbu volumetrických kompenzačních tabulek.

Měření velkých strojů je omezeno rozsahem LTc, proto je pro velké prostory možné softwarové napojení více sousedících prostorů. Z důvodu možnosti změření maximálního objemu pracovního prostoru je vhodné využít speciálních adapterů navržených přímo pro daný stroj. Měření LTc je stejně jako každé interferometrické měření ovlivněno okolními podmínkami jako je tlak, vlhkost a teplota, proto je vhodné měřit po co nejkratší dobu ať už z hlediska drahého pracovního času stroje, nebo právě i co nejmenšího vlivu těchto s časem se měnících veličin. Vliv na měření mohou mít i vibrace. Při silných vibracích může dojít k tomu, že paprsek laseru se neustálí a naměřená hodnota bude nepřesná nebo vyřazená z měření.

4.3.1 Metody snímání

Kvalita kalibrace i spokojenost majitele obráběcího stroje je úzce spjata s délkou měření, jež lze znatelně omezit volbou metody snímání bodů. Tyto metody jsou: time delay, trigger nebo on-the-fly. Ty jsou v této práci klíčové, neboť jejich srovnání je účelem této práce.

Time delay

Při časovém snímání bodů není propojen LTc s řídicím systémem stroje. V NC programu je pouze nastavena určitá doba čekání po najetí do měřeného bodu na ustálení laseru.

Po této pauze stroj pokračuje do dalšího bodu. Jedná se o nejjednodušší a také nejpoužívanější metodu, přestože je časově nejnáročnější.

Trigger

Při použití triggeru je již LTc propojen s řídicím systémem stroje, a proto při najetí do polohy stroj čeká na signál, který je vyslán až po ustálení paprsku a zaznamenání pozice. Poté stroj pokračuje do další polohy. To vede k značnému zkrácení měřících časů a zároveň k lepším výsledkům v důsledku snížení okolních vlivů dobou měření. Konkrétní zkrácení času měření pomocí triggeru popisuje článek *Geometric accuracy of CNC machine tools* [11]. Tabulka porovnává časy při měření s time delay a triggerem při posuvech 3000 a 6000 mm/min.

Tab 2) Porovnání doby měření triggerem a time delay [11]

Měřený prostor [m ²]	0,13
Doba časového měření [min]	99
Doba triggeru 3000 mm/min [min]	54
Relativní doba triggeru 3000 mm/min vůči time delay	54,5 %
Doba triggeru 6000 mm/min [min]	38
Relativní doba triggeru 6000 mm/min vůči time delay	38,4 %

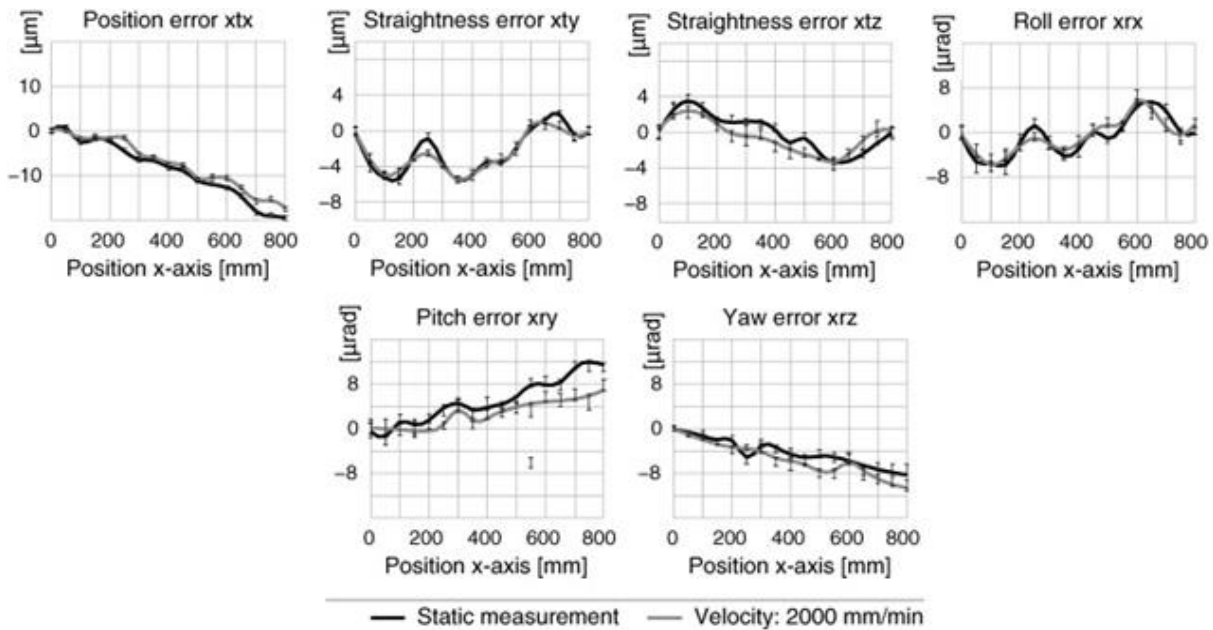
On-the-fly

Jedná se o u nás relativně nezkoušenou metodu snímání měřených bodů. LTc je propojen s řídicím systémem přes rychlý vstup obrobkové sondy. Pohyb mezi body je kontinuální a je měřena vždy jedna celá přímka v prostotu a po jejím vyhodnocení pokračuje měření na přímce následující. Tím lze extrémně redukovat dobu měření a stejně tak získat daleko větší množství měřených bodů. Podle studie *On-the-fly calibration of linear and rotary axes of machinetools and CMMs using a tracking interferometer* [12] je tento typ měření možný s relativně malou odchylkou od měření statického. Výsledky této práce jsou uvedeny v tabulce (Tab 3) s rozdíly v době měření při posuvu 2000 mm/ min a doby čekání 3 sekundy.

Tab 3) Porovnání doby měření on-the fly a time delay [12]

Měřený prostor	1 m ³		3 m ³	
	25 mm	10 mm	25 mm	10 mm
Interval mezi body [mm]	25 mm	10 mm	25 mm	10 mm
Doba statického (time delay) [min]	82	128	385	847
Doba kontinuálního (on the fly) [min]	26	26	77	77
Relativní doba	20 %	9 %	20 %	9 %

Grafy na obrázku (Obr. 8) znázorňují průběhy vybraných chyb při měření kontinuálním a statickým. Dle hodnot lze říci, že rozdíly mezi jednotlivými průběhy jsou v rozsahu nejistoty a čas ušetřený metodou on-the-fly je znatelný.



Obr. 8) Grafy porovnávající rozdíl průběhu jednotlivých chyb pomocí metody on-the-fly a time delay [12]

4.3.2 Shrnutí

Samonaváděcí laserové přístroje jsou v současné době to nejlepší pro měření volumetrické přesnosti, a je schopny i měření shodných s měřeními s přístroji Ballbar a Laser Interferometer. Software, který je součástí zařízení, je schopen generovat kompenzační tabulky. I když je doba měření v porovnání s konvenčními interferometry kratší, stále existují tendence dobu měření snižovat. Ať už kvůli zmenšení okolních vlivů, nebo kvůli požadavkům zákazníka. Tohoto cíle je možné dosáhnout například právě pomocí různých metod snímání jednotlivých bodů.

5 NÁVRH A REALIZACE PROPOJENÍ SYSTÉMU

Pro realizaci měření typu on-the-fly je zapotřebí propojit systém LTc a v našem případě Siemens Sinumerik. Při tomto návrhu vyjdeme z návodu Etalonu [13]. Pro zapojení musí řídicí systém splňovat určité požadavky:

- volný ethernetový vstup, možno využít vstupy X120, X130 a X127
- volný digitální („rychlý“) vstup, možno využít X122 a X132.
- dostatečný počet R parametrů (doporučeno alespoň 100)

Na straně systému LTc je potřeba:

- triggerovací karta
- triggerovací kabel, digitální, 24 V

Při realizaci jsme využili ethernetový vstup X127 (Obr.9), jež jsme propojili s osobním počítačem.



Obr. 9) Realizace zapojení Ethernetového kabelu

Propojení triggerovací karty se systémem stroje je uskutečněno pomocí takzvaného rychlého digitálního vstupu sloužícího zejména pro signály obrobkové nebo nástrojové sondy. Popis terminálů X122 a X132 můžeme pozorovat na obrázku (Obr. 10). [14]

X122 terminal assignment

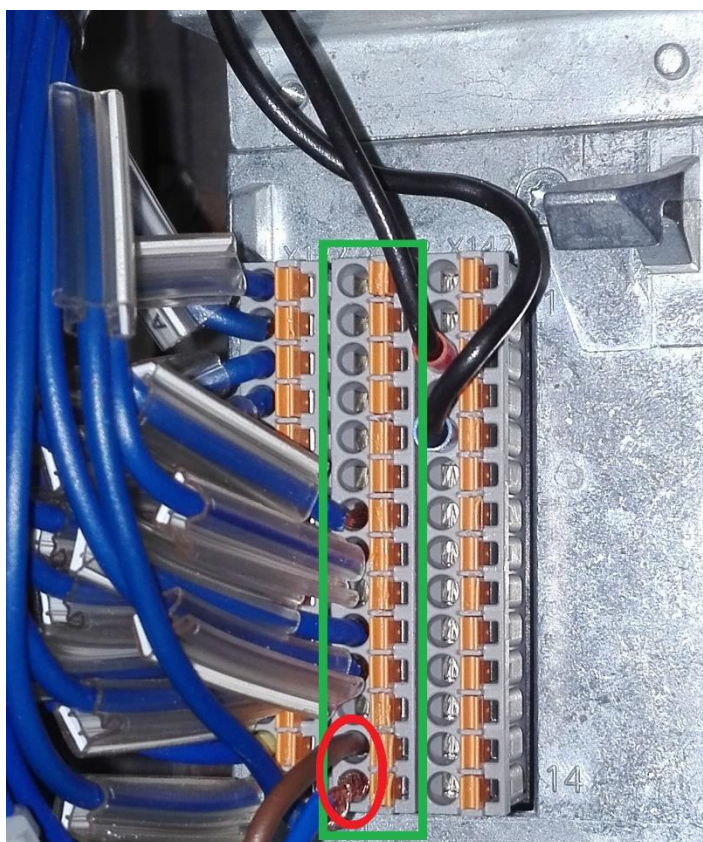
Terminal	Signal name	Function	Pre-assignment
X122.1	DI 0	Input ON/OFF1 infeed (if one infeed with a DRIVE-CLIQ connection is operated at the NCU)	x
X122.2	DI 1	Input 2, Operating condition OFF3 drives "OFF3 rapid stop" Braking with a configurable OFF3 ramp (p1135, p1136, p1137); thereafter, pulse suppression and switching on inhibited. The drive stops controlled. The braking response can be set separately for each SERVO.	x
X122.3	DI 2	Selection safe standstill group 1 SH/SBC - Group 1 SINAMICS Safety Integrated (SH = p9601 release)	---
X122.4	DI 3	Selection safe standstill group 2 SH/SBC - Group 2 SINAMICS Safety Integrated (SH = p9601 release)	---
X122.5	DI16	Freely available	---
X122.6	DI17	Freely available	---
X122.7	Ground for terminals 1...6		
X122.8	Ground for terminals 9, 10, 12, 13		
X122.9	DI/DO 8	Status safe standstill group 1 SH/SBC - Group 1 SINAMICS Safety Integrated	---
X122.10	DI/DO 9	Status safe standstill group 2 SH/SBC - Group 2 SINAMICS Safety Integrated	---
X122.11	Ground for terminals 9, 10, 12, 13		---
X122.12	DI/DO 10	Input, external zero mark - BERO 1	---
X122.13	DI/DO 11	Input probe 1 - central measurement (Check that MD13210 = 0) Input probe 1 - distributed measurement (Check that MD13210 = 1)	x
X122.14	Ground for terminals 9, 10, 12, 13		

X132 terminal assignment

Terminal	Signal name	Function	Pre-assignment
X132.1	DI 4	Freely available	---
X132.2	DI 5	Freely available	---
X132.3	DI 6	Freely available	---
X132.4	DI 7	Infeed line contactor feedback signal (if one infeed is operated with a DRIVE-CLIQ connection at the NCU)	---
X132.5	DI20	Freely available	---
X132.6	DI21	Freely available	---
X132.7	Ground for terminals 1...6		
X132.8	Ground for terminals 9, 10, 12, 13		
X132.9	DI/DO 12	Output: Infeed operation (if one infeed is operated with a DRIVE-CLIQ connection at the NCU) Input 2, Operating condition OFF2 drives	x
X132.10	DI/DO 13	Output: Status, infeed ready to start (if one infeed is operated at the NCU with a DRIVE-CLIQ connection) Input 2, Operating condition OFF2 drives Input, external zero mark 2 Input probe 2 - central measurement Input probe 2 - distributed measurement	x
X132.11	Ground for terminals 9, 10, 12, 13		---
X132.12	DI/DO 14	Input 2, Operating condition OFF2 drives Input, external zero mark 3 Input probe 2 - central measurement Input probe 2 - distributed measurement Infeed, control line contactor	---
X132.13	DI/DO 15	Input 2, Operating condition OFF2 drives Input, external zero mark 4 Input probe 2 - central measurement Input probe 2 - distributed measurement	---
X132.14	Ground for terminals 9, 10, 12, 13		---

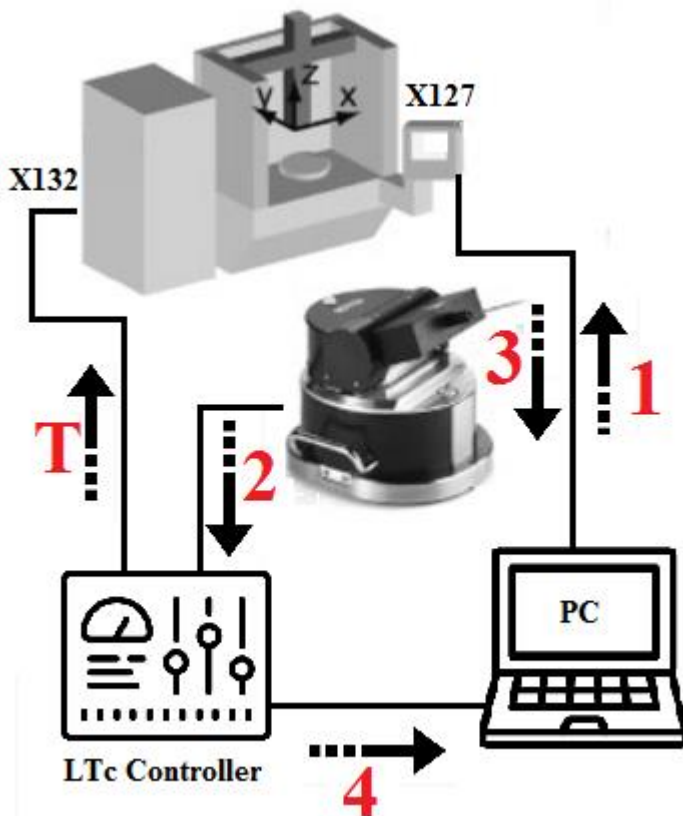
Obr. 10) Detail terminálů X122 a X132 [14]

Rozhodli jsme se pro využití volného vstupu X132.13 a k němu příslušnému uzemnění X132.14. Zapojení triggerovacího kabelu je znázorněno na obrázku.



Obr. 11) Terminál X132 (zeleně) a jeho pozice 13 a 14 (červeně)

Schéma (Obr 12.) znázorňuje propojení jednotlivých komponentů. V systému Sinumerik je nahraný NC program, který je ovládán pokyny z osobního počítače. Tedy nejdříve PC vyšle signál stroji k pohybu (1). V průběhu pohybu stroje vysílá zároveň LTc naměřenou délku paprsku (2) a triggerovací karta dává digitální impulzy pro uložení současné pozice stroje (T). Po změření jedné přímky jsou ethernetovým kabelem všechna data pozic stroje odeslána do PC (3). Zároveň LTc Controller posílá data průběhu délek paprsku do osobního počítače (4), kde jsou data vyhodnocena. Pokud je vše v pořádku, postup se opakuje v nové pozici.



Obr. 12) Schéma propojení komponentů

6 SOFTWARE TRAC-CAL

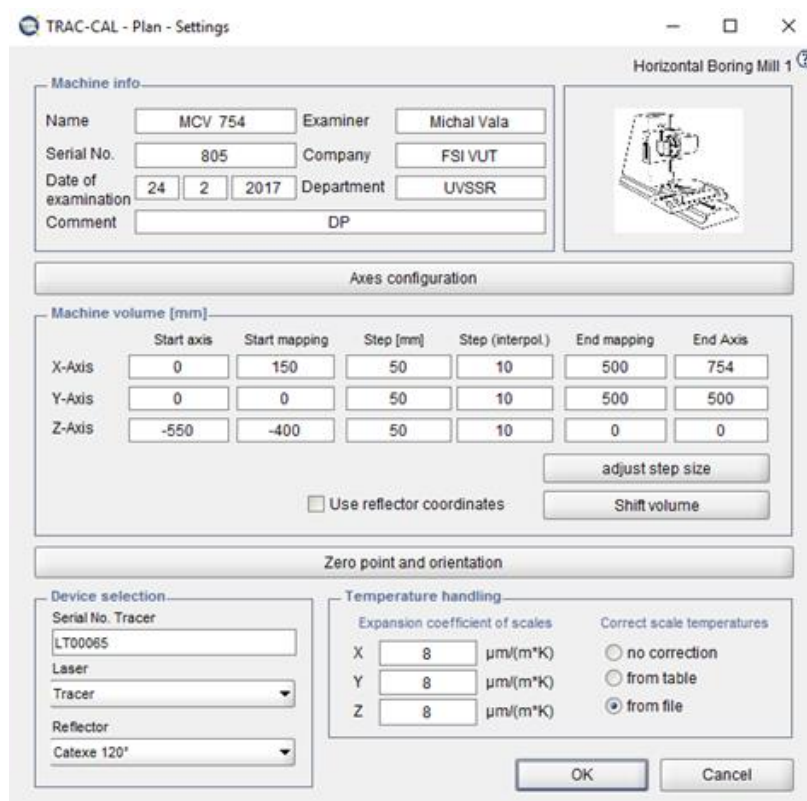
V této kapitole se seznámíme se softwarovým prostředím LTc, konkrétně s Trac-cal. Současně vybudujeme měřicí strategii pro metody trigger i on-the-fly.

6.1 Prostředí Trac-cal – Plan

Záložka *Plan* slouží k plánování strategie. Zde je třeba zvolit určité možnosti v závislosti na typu stroje, měřicího zařízení, druhu odražeče a jiné.

6.1.1 Settings

V okně *Settings* (Obr. 13) je nutné vyplnit některé identifikační informace o stroji a metrologovi a následně pod tlačítkem *Axis configuration* nastavit kinematiku měřeného stroje. Náš stroj je MCV 754 QUICK firmy KOVOSVIT MAS. Kinematický řetězec toho stroje od obrobku (W) po nástroj (T) je W-X-Y-Z-T. Tento řetězec je třeba vybrat ze skupiny nabízených softwarů.



Horizontal Boring Mill 1

Machine info

Name: MCV 754 Examiner: Michal Vala

Serial No.: 805 Company: FSI VUT

Date of examination: 24 2 2017 Department: UVSSR

Comment: DP

Axes configuration

Machine volume [mm]

	Start axis	Start mapping	Step [mm]	Step (interpol.)	End mapping	End Axis
X-Axis	0	150	50	10	500	754
Y-Axis	0	0	50	10	500	500
Z-Axis	-550	-400	50	10	0	0

adjust step size

Use reflector coordinates

Shift volume

Zero point and orientation

Device selection

Serial No. Tracer: LT00065

Laser: [dropdown]

Tracer: [dropdown]

Reflector: Catexa 120*

Temperature handling

Expansion coefficient of scales

X: 8 μm/(m*K)

Y: 8 μm/(m*K)

Z: 8 μm/(m*K)

Correct scale temperatures

no correction

from table

from file

OK Cancel

Obr. 13) Trac-cal – Plan – Settings

V druhé části *Machine volume* definujeme měřený objem stroje. Výše zmíněné frézovací centrum má rozsah os X / Y / Z–754 / 500 / 550 mm a upínací plochu stolu 1000 x 500 mm. Z důvodu zjednodušení upínání LTc na stůl, jsme zkrátily oblast v ose X o 150 mm z obou stran a v ose Z si necháváme rezervu 150 mm na odražeč a jeho případné adaptéry. Neměřený zbytek prostoru bude kompenzován interpolací. *Step* značí vzdálenost mezi jednotlivými měřeními body. [15]

Device selection slouží k identifikaci měřicího zařízení. Program Trac-cal je možno využít nejen pro měření s LTc, ale i s různými Treckery jako je Leica nebo Faro. Pro náš případ

volíme *Tracer*. Dále je třeba zvolit používaný reflektor laserového paprsku. Pro účely malého frézovacího centra, na kterém budeme měřit, je vhodnější odražeč s menším dosahem a větším úhlem 160°.

V poslední části zvolíme teplotní roztažnost pravítka stroje. Lineární stupnice se vyrábějí z různých materiálů. Jednotlivé druhy a jejich roztažnosti můžeme sledovat v tabulce (Tab 4). Náš stroj je vybaven skleněnými stupnicemi na každé ose.

Tab 4) Materiály lineárních pravítek pro obráběcí stroje [16]

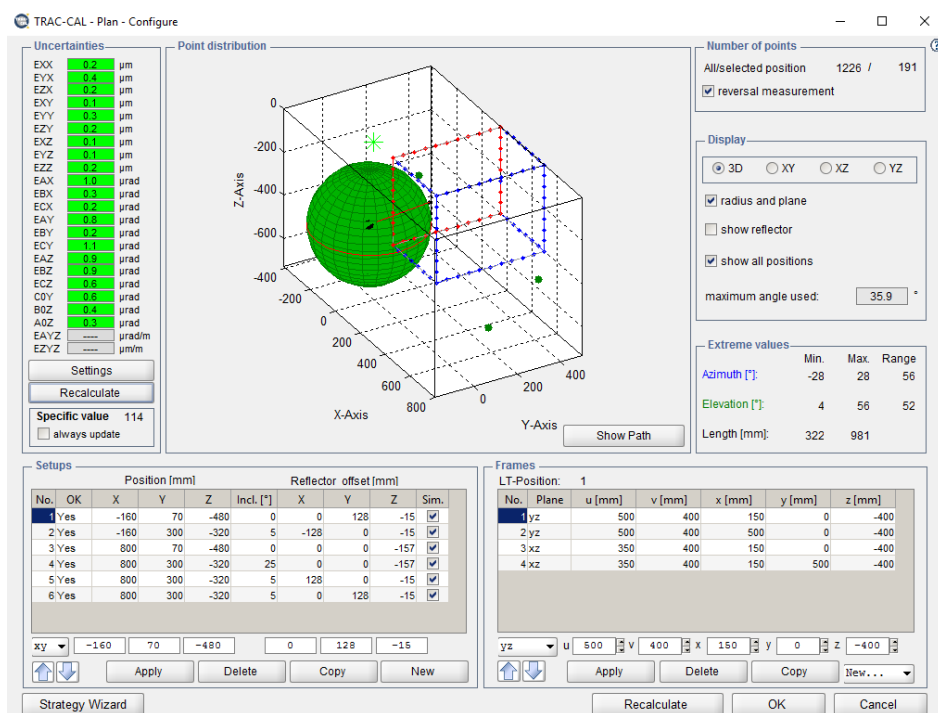
Skleněná stupnice	8 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$
Stupnice z nerezové oceli	10,1 \pm 0,2 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$
Stupnice z materiálu ZeroMet	0,75 \pm 0,35 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$

6.1.2 Select model

Volba modelu ovlivňuje počet pozic, ze kterých musí LTc prostor měřit a také volbu offsetu reflektoru. Pro náš případ využijeme model FRB zahrnující 21 parametrů tříosého stroje. Při využití tohoto modelu je třeba provést měření z šesti pozic. Pro porovnání, model RRB zahrnuje pouze 17 parametrů, a vystačí s měřením z pozic čtyř.

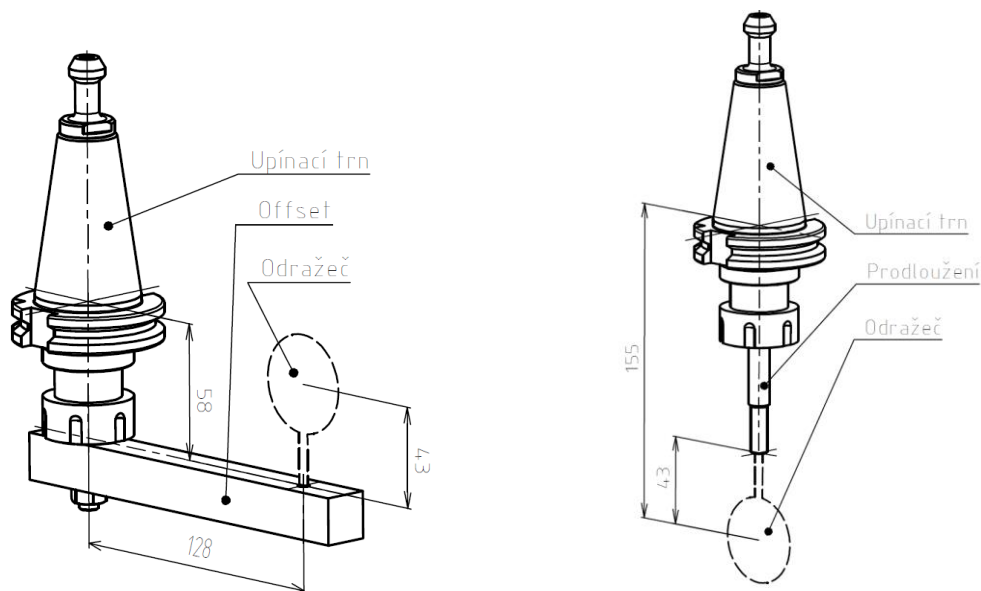
6.1.3 Configure

Nejdůležitější částí je bezpochyby konfigurace strategie (Obr. 14). Volbou vhodného umístění LTc v pracovním prostoru stroje a nastavení offsetu reflektoru, jsme schopni korigovat nejistoty měření jednotlivých parametrů chyb na přijatelnou mez. Touto mezí byly nejistoty do 0,5 μm pro chyby polohování a přímosti, pro chyby uhlové a kolmostí hodnota nesměla přesáhnout 1,5 μrad . Výsledné nejistoty spočítané softwarem jsou viditelné v levém horním rohu okna *Configure*.



Obr. 14) Trac-cal – Plan – Configure

Umístění laserové hlavy není omezeno pracovním objemem, je však třeba dávat pozor na případné kolize s částmi stroje. Pro umístění LTc můžeme pracovat s různými adaptéry a podstavci, jež je možné naklápět pod úhlem. Také je vhodné využívat offsety reflektoru pro zviditelnění rotačních chyb díky prodlouženému rameni odražeče. V našem případě pro upevnění hlavy využijeme speciální desku a naklápěcí podstavec. Pro získání daného offsetu využijeme dva adaptéry vložené do kleštiny upínacího trnu.



Obr. 15) Adaptéry využité pro prodloužení ramene odražeče

V levém dolním rohu v kolonce *settings* se nachází důležitá tabulka s přibližnými hodnotami umístění LTc v prostoru stroje, úhel značí naklonění podstavce a je brán vzhledem k rovině stolu. Tyto souřadnice značící umístění referenční koule LTc hlavy (Obr. 16–21) v prostoru stroje jsou shrnuty v tabulkách (Tab 5–10).

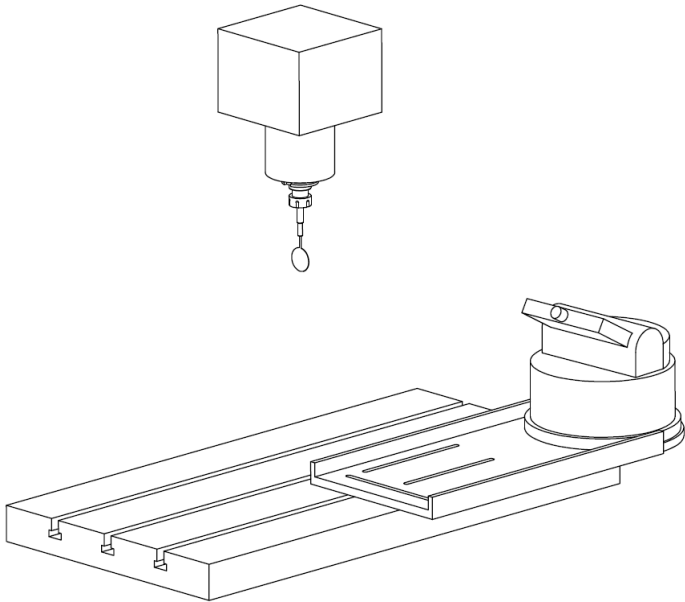
Tab 5) Poloha č.1 - Umístění LTc a odražeče

<p>Obr. 16) Poloha č.1 - Umístění LTc a odražeče</p>	Poloha LTc	
	X [mm]	-160
	Y [mm]	70
	Z [mm]	-480
	Úhel [°]	0
	Poloha odražeče	
	X [mm]	0
	Y [mm]	128
	Z [mm]	-15

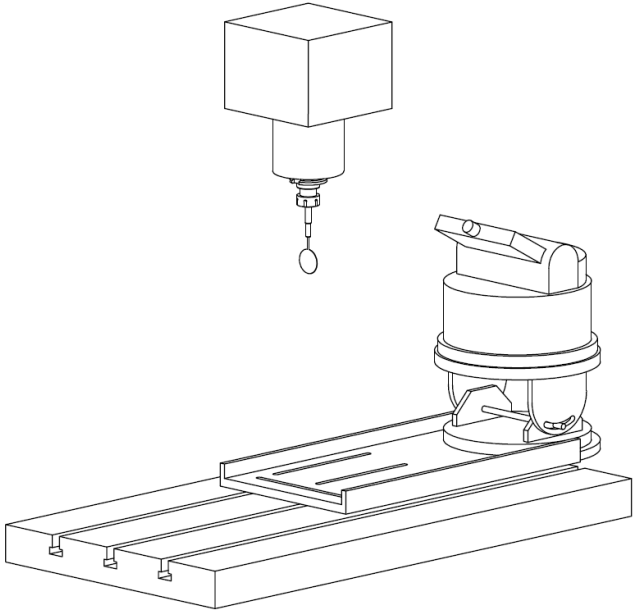
Tab 6) Poloha č.2 - Umístění LTc a odražeče

<p>Obr. 17) Poloha č.2 - Umístění LTc a odražeče</p>	Poloha LTc	
	X [mm]	-160
	Y [mm]	300
	Z [mm]	-320
	Úhel [°]	5
	Poloha odražeče	
	X [mm]	-128
	Y [mm]	0
	Z [mm]	-15

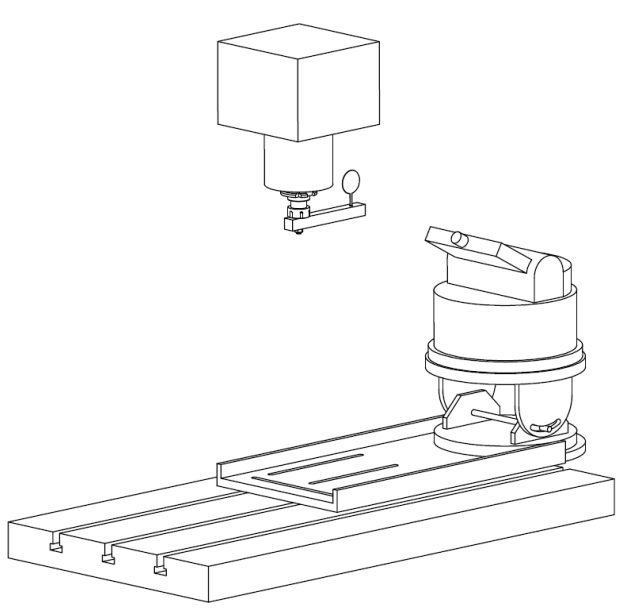
Tab 7) Poloha č.3 - Umístění LTc a odražeče

 <p>Obr. 18) Poloha č.3 - Umístění LTc a odražeče</p>	Poloha LTc	
	X [mm]	800
	Y [mm]	70
	Z [mm]	-480
	Úhel [°]	0
	Poloha odražeče	
	X [mm]	0
	Y [mm]	0
	Z [mm]	-157

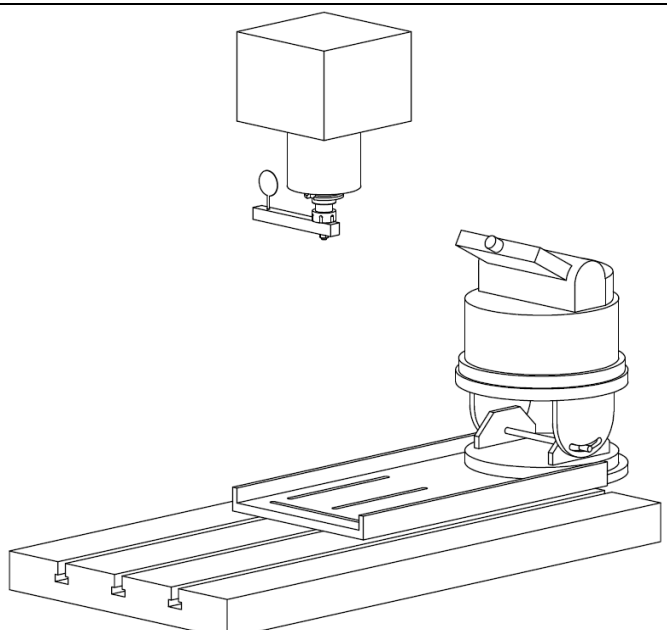
Tab 8) Poloha č.4 - Umístění LTc a odražeče

 <p>Obr. 19) Poloha č.4 - Umístění LTc a odražeče</p>	Poloha LTc	
	X [mm]	800
	Y [mm]	300
	Z [mm]	-320
	Úhel [°]	25
	Poloha odražeče	
	X [mm]	0
	Y [mm]	0
	Z [mm]	-157

Tab 9) Poloha č.5 - Umístění LTc a odražeče

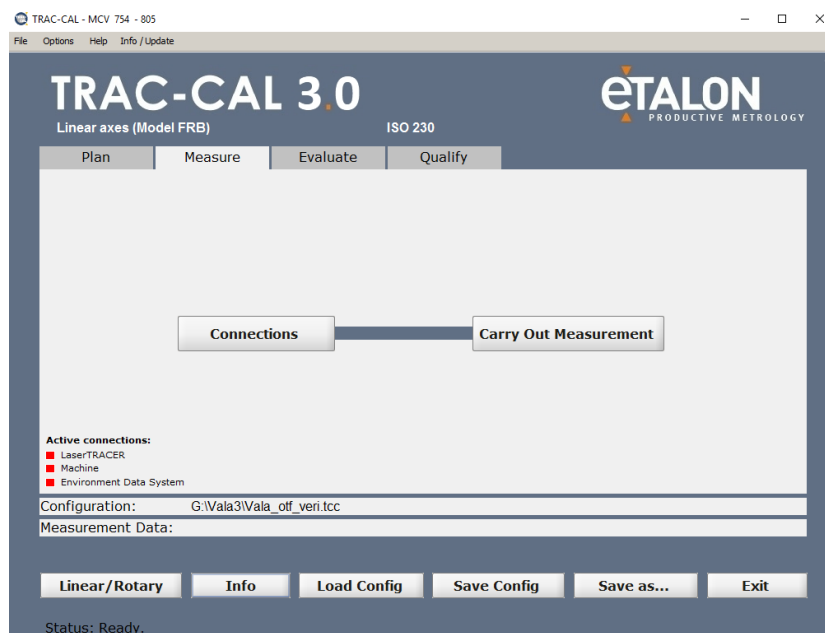
 <p>Obr. 20) Poloha č.5 - Umístění LTc a odražeče</p>	Poloha LTc	
	X [mm]	800
	Y [mm]	300
	Z [mm]	-320
	Úhel [°]	5
	Poloha odražeče	
	X [mm]	128
	Y [mm]	0
	Z [mm]	-15

Tab 10) Poloha č.6 - Umístění LTc a odražeče

 <p>Obr. 21) Poloha č.6 - Umístění LTc a odražeče</p>	Poloha LTc	
	X [mm]	800
	Y [mm]	300
	Z [mm]	-320
	Úhel [°]	5
	Poloha odražeče	
	X [mm]	0
	Y [mm]	128
	Z [mm]	-15

6.2 Measure

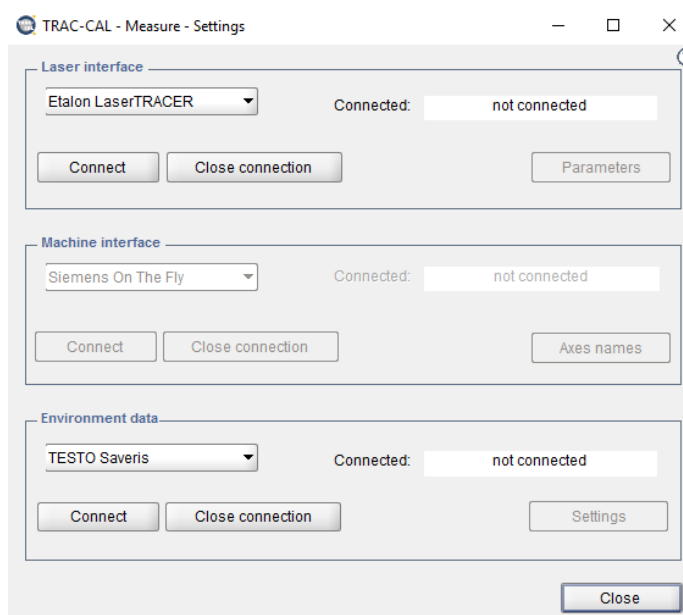
V následující záložce (Obr. 22) už jen propojíme všechny důležité prvky a provedeme měření v daných pozicích dle naší volby. Do této doby bylo, jak pro měření způsobem trigger, tak i on-the-fly, nastavení totožné, ale v tuto chvíli již budou volby odlišné.



Obr. 22) Trac-cal – Measure

6.2.1 Connection

Zde (Obr. 23) je potřeba aktivovat připojení měřícího zařízení. V našem případě to je LTc, ale je možné připojit i trackery Leica nebo Faro. Dále zvolit požadovanou metodu snímání bodů. V prvním případě to bude trigger, v druhém Siemens on-the-fly. Touto volbou aktivujeme propojení s triggerovací kartou potřebou pro obě měření. Při volbě Siemens On-the-fly jsme postupovali dle návodu [13]. Posledním prvkem je připojení senzorů teplot, tlaku a vlhkosti.



Obr. 23) Trac-cal – Measure – Settings

6.2.2 Carry out measurement

V této záložce dochází k měření. Umístíme LTc, měníme offset a prodloužení odražeče dle strategie. Postupně změříme prostor ze všech šesti pozic. U metody on-the-fly zde však několik možností pro optimalizaci.

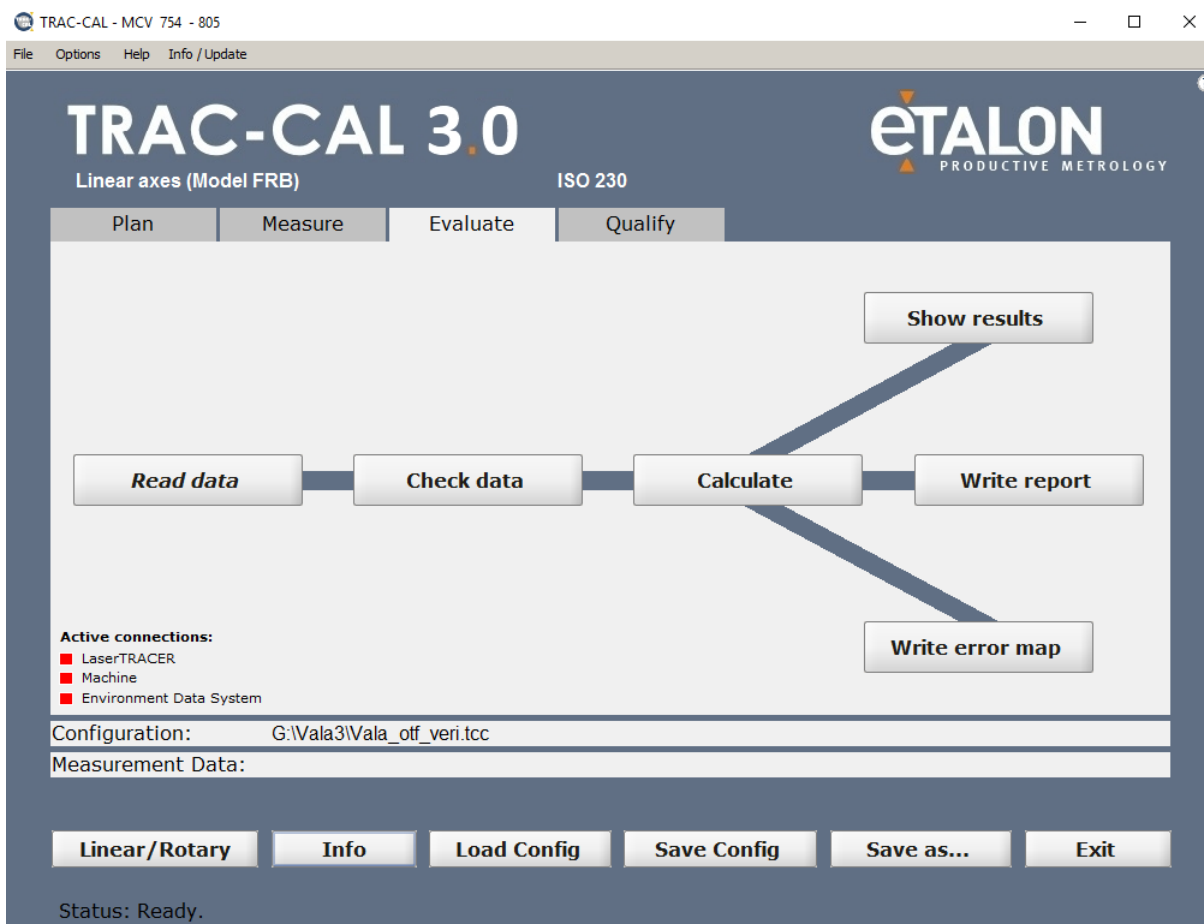
Pro synchronizaci obou sytému je třeba dvou kroků, a to definovat polohu LTc a definovat zpoždění signálů. Definování polohy LTc lze provést pomocí *Measure tracer position*. Zde je nadefinováno šest bodů jejichž postupným změřením se dopočítá poloha LTc v prostoru. Teprve poté je možno definovat zpoždění signálů (*Determination of delay*), to je potřeba provést opakovaně pro všechny osy. Tím je zajištěno že vzorkování signálů ze stroje i LTc se bude shodovat. [13]

Po měření metodou on-the-fly zvolíme jakým způsobem budou vzniká body přetransformovány na body odpovídající kroku definovaného v kapitole 6.1.1. Touto metodou totiž počet naměřených bodů záleží na zadané frekvenci a rychlosti posuvu, tedy neodpovídá původnímu nastavení. K tomu slouží takzvané *váhování*: [13]

- Obdélníkové – všechny hodnoty v intervalu mají stejnou váhu
- Trojúhelníkové – nejvyšší váhu má naměřený bod, který je nejbližší bodu definovaného strategií (doporučeno)
- Medián – je zvolena hodna odpovídající mediánu intervalu naměřených hodnot

6.3 Evaluate

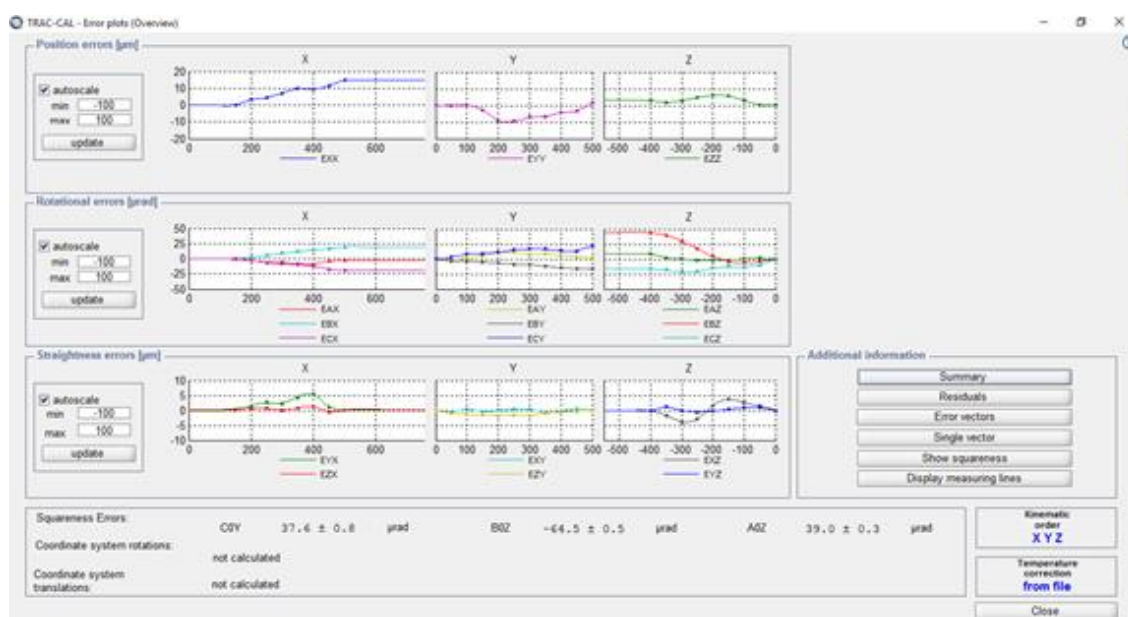
V této záložce (Obr. 24) prvně načteme naměřená data, ty následně zkontroluje a zvolíme, jaké pozice budeme při výpočtu brát v ohled (*Check data*). Některé pozice můžeme z důvodu přerušení paprsku nebo jiných problémů měřit víckrát, potom tedy zvolíme to měření dané pozice s nejlepším průběhem. Následný výpočet (*Calculate*) nám již analyzuje veškeré chyby stroje. Jejich průběhy si můžeme prohlédnout v *Show results*. Ve *Write error map* vygenerujeme kompenzační tabulku dle naměřených hodnot pro většinu standartních řídicích systémů.



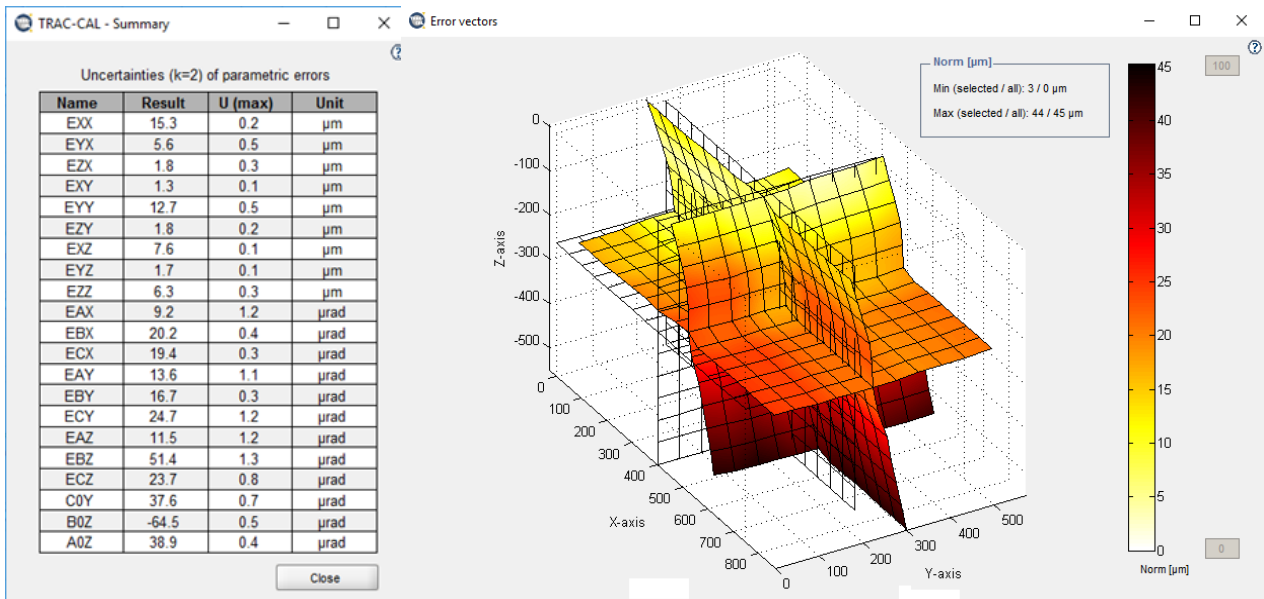
Obr. 24) Trac-cal – Evaluate

6.3.1 Show results

Nyní máme možnost vidět průběhy (Obr. 25) a rozsahy chyb polohování, přímostí a rotace (Obr. 26a). Uhlvé odchylky kolmostí všech tří os a vektorovou mapu (Obr. 26b) znázorňující součet 21 chyb stroje v každém místě prostoru stroje.



Obr. 25) Trac-cal – Measure – Show results



Obr. 26) a) Tabulka výsledných rozsahů chyb (Summary), b) Vektorová mapa chyb (Error vectors)

7 VYHODNOCENÍ-TRIGGER

V této kapitole budeme vyhodnocovat výsledky měření provedené metodou trigger. Posoudíme rozdíly mezi měřeními, a to jak mezi jednotlivými chybami stroje, tak i volumetrickou chybou.

7.1 Kalibrační měření

Provedeme takzvané kalibrační měření na stroji bez jakýchkoli aktivních kompenzací.

7.1.1 LTc

Nejdříve pomocí zařízení LTc. Následují výsledky rozsahů odchylek, časové a teplotní údaje (Tab 11–12).

Tab 11) Výsledky rozsahů úchylek před kompenzací

Parametr	Úchylka	Nejistota (95%)
EXX	15,3 μm	0,2 μm
EYX	5,6 μm	0,5 μm
EZX	1,8 μm	0,3 μm
EXY	1,3 μm	0,1 μm
EYY	12,7 μm	0,5 μm
EZY	1,8 μm	0,2 μm
EXZ	7,6 μm	0,1 μm
EYZ	1,7 μm	0,1 μm
EZZ	6,3 μm	0,3 μm
EAX	9,2 μrad	1,2 μrad
EBX	20,2 μrad	0,4 μrad
ECX	19,4 μrad	0,3 μrad
EAY	13,6 μrad	1,1 μrad
EBY	16,7 μrad	0,3 μrad
ECY	24,7 μrad	1,2 μrad
EAZ	11,5 μrad	1,2 μrad
EBZ	51,4 μrad	1,3 μrad
ECZ	23,7 μrad	0,8 μrad
C0Y	37,6 μrad	0,7 μrad
B0Z	-64,5 μrad	0,5 μrad
A0Z	38,9 μrad	0,4 μrad

Tab 12) Tabulka postupu měření s jednotlivými časy a teplotami

Pozice	Datum	Start	Konec	Trvání	Teplota start [°C]	Teplota konec [°C]	Teplotní drift [°C]	Gradient [°C/h]	Průměr [°C]
1	7.4.2017	9:06:15	9:15:2	0:09:05	18,16	18,18	0,02	0,1	18,2
2	7.4.2017	9:30:27	9:43:26	0:12:59	18,68	18,31	0,37	1,7	18,5
6	7.4.2017	10:00:15	10:07:52	0:07:37	18,78	18,68	0,1	0,8	18,7
5	7.4.2017	10:13:27	10:23:06	0:09:39	20,1	19,26	0,84	5,3	19,7
4	7.4.2017	10:38:05	10:48:52	0:10:47	19,27	19,28	0,01	0	19,3
3	7.4.2017	10:57:31	11:05:27	0:07:56	20,11	19,47	0,64	4,8	19,8
				0:58:03					

7.1.2 Ballbar

Na stroji bez kompenzačních tabulek byl proveden test Ballbarem. Toto měření slouží jako referenční pro zhodnocení výsledků jednotlivých metod. Test byl proveden při rychlostech posuvu 1000, 2000 a 3000 mm/min. Následná diagnostika rozděluje váhu jednotlivým chybám. My sledujeme chyby kruhovitosti, kolmosti, přímočarosti, odměřování a tolerance polohy ve všech třech rovinách (Tab 13–15). Tato měření probíhala při teplotě 21,5 °C.

Tab 13) Hodnoty diagnostiky Ballbaru pro rovinu XY

	1000 mm/min	2000 mm/min	4000 mm/min
Kruhovitost	8,9 μm	9,1 μm	10 μm
Kolmost	20,6 μm/m	20,2 μm/m	20 μm/m
Přímocířarost X	-3,9 μm	-3,6 μm	-3,8 μm
Přímocířarost Y	-1,1 μm	-1,1 μm	-1,1 μm
Chyba odměřování X	35,1 μm/m	35,2 μm/m	37,8 μm/m
Chyba odměřování Y	-2,3 μm/m	-0,6 μm/m	-3 μm/m
Tolerance polohy	26,2 μm	25,9 μm	27,4 μm

Tab 14) Hodnoty diagnostiky Ballbaru pro rovinu YZ

	1000 mm/min	2000 mm/min	4000 mm/min
Kruhovitost	11,9 μm	11,9 μm	11,8 μm
Kolmost	57,3 μm/m	57,2 μm/m	56,2 μm/m
Přímocířarost Y	1,2 μm	1,2 μm	1,2 μm
Přímocířarost Z	0,3 μm	0,2 μm	0,2 μm
Chyba odměřování Y	6,2 μm/m	8,4 μm/m	11,9 μm/m
Chyba odměřování Z	32,8 μm/m	34,2 μm/m	37,7 μm/m
Tolerance polohy	27 μm	27,5 μm	28,5 μm

Tab 15) Hodnoty diagnostiky Ballbaru pro rovinu ZX

	1000 mm/min	2000 mm/min	4000 mm/min
Kruhovitost	10,6 μm	11 μm	12,1 μm
Kolmost	55,5 $\mu\text{m/m}$	56 $\mu\text{m/m}$	56,5 $\mu\text{m/m}$
Přímočarost Z	12,3 μm	12,5 μm	12,3 μm
Přímočarost X	0,3 μm	0,3 μm	0,1 μm
Chyba odměřování Z	41,8 $\mu\text{m/m}$	43,6 $\mu\text{m/m}$	46,8 $\mu\text{m/m}$
Chyba odměřování X	36,9 $\mu\text{m/m}$	38,5 $\mu\text{m/m}$	41,1 $\mu\text{m/m}$
Tolerance polohy	49,9 μm	50,9 μm	52,2 μm

Z výsledku měření je patrné, že na námi vybrané parametry nemá dynamika, tedy zvyšování rychlosti, výrazný vliv. Proto v následujících měřeních budeme provádět pouze měření při 2000 mm/min. Na obrázku (Obr. 27) je již jen pro posuvovou rychlost 2000 mm/min volumetrické vyhodnocení. Výsledná kulovitost je 11,9 μm .

Volumetrická diagnostika Ballbar (μm)

RENISHAW

Stroj: Kovosvit MAS

Parametry testu

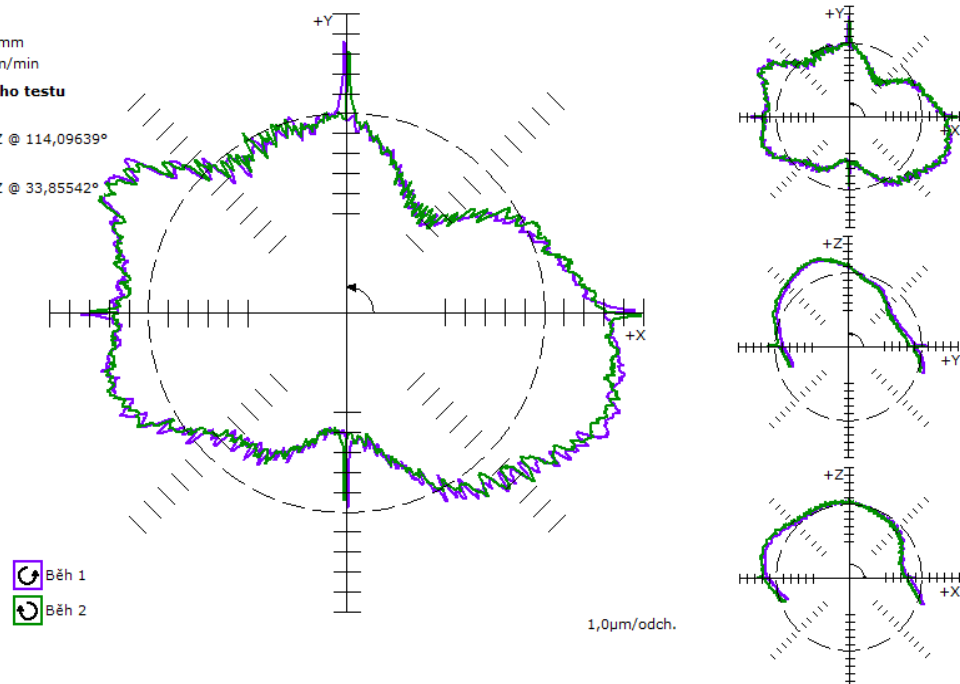
Poloměr 150,0000mm
 Posuv 2000,0mm/min

Výsledky volumetrického testu

Max. odchylka 5,8 μm
 Rovina YZ @ 114,09639°
 Min. odchylka -6,2 μm
 Rovina YZ @ 33,85542°
 Kulovitost 11,9 μm

Kruhovitost

XY 9,1 μm
 YZ 11,9 μm
 ZX 11,0 μm



Obr. 27) Volumetrická diagnostika bez kompenzace

7.2 Verifikační měření

Nyní na stroj nahrajeme volumetrickou kompenzační tabulku. Verifikační měření odhalí, jak úspěšná kalibrace byla.

7.2.1 LTc

Opět provedeme měření LTc na zkompenzovaném stroji. Výsledky rozsahů odchylek, časové a teplotní údaje znázorňují tabulky (Tab 16–17).

Tab 16) Výsledky rozsahů úchylek s kompenzací

Parametr	Úchylka	Nejistota (95%)
EXX	2,5 μm	0,3 μm
EYX	2 μm	0,7 μm
EZX	2 μm	0,3 μm
EXY	2,4 μm	0,1 μm
EYY	13,1 μm	0,5 μm
EZY	6,1 μm	0,3 μm
EXZ	0,4 μm	0,1 μm
EYZ	0,5 μm	0,1 μm
EZZ	5,8 μm	0,3 μm
EAX	6,4 μrad	1,7 μrad
EBX	10,9 μrad	0,5 μrad
ECX	7,7 μrad	0,4 μrad
EAY	22,6 μrad	1,1 μrad
EBY	4,1 μrad	0,3 μrad
ECY	39,1 μrad	1,4 μrad
EAZ	17 μrad	1,2 μrad
EBZ	86,9 μrad	1 μrad
ECZ	24,7 μrad	1 μrad
C0Y	4,6 μrad	0,8 μrad
B0Z	-8,1 μrad	0,6 μrad
A0Z	10,6 μrad	0,4 μrad

Tab 17) Tabulka postupu měření s jednotlivými časy a teplotami

Pozice	Datum	Start	Konec	Trvání	Teplota start [°C]	Teplota konec [°C]	Teplotní drift [°C]	Gradient [°C/h]	Průměr [°C]
3	7.4.2017	12:03:39	12:11:22	0:07:43	19,4	19,29	0,16	1,2	19,4
4	7.4.2017	12:18:35	12:29:43	0:11:08	19,6	19,38	0,28	1,5	19,5
5	7.4.2017	12:54:43	13:09:30	0:14:47	20,9	19,5	1,4	5,6	20,2
6	7.4.2017	15:08:29	15:15:50	0:07:21	20	19,9	0,1	0,8	20
2	7.4.2017	15:21:05	15:27:52	0:06:47	19,7	19,4	0,3	2,6	19,6
1	7.4.2017	15:39:01	15:49:30	0:10:29	19,5	19,25	0,25	1,4	19,4
				0:58:15					

7.2.2 Ballbar

Provedeme verifikační měření Ballbarem. Nyní již pouze při posuvové rychlosti 2000 mm/min. Toto měření probíhalo při teplotě 21,5 °C. Výsledné hodnoty obsahují tabulky (Tab 18–20).

Tab 18) Hodnoty diagnostiky Ballbaru pro rovinu XY

	2000 mm/min
Kruhovitost	6,4 μm
Kolmost	5 μm/m
Přímočarost X	1 μm
Přímočarost Y	0,1 μm
Chyba odměřování X	6,1 μm/m
Chyba odměřování Y	11,6 μm/m
Tolerance polohy	9,8 μm

Tab 19) Hodnoty diagnostiky Ballbaru pro rovinu YZ

	2000 mm/min
Kruhovitost	5,5 μm
Kolmost	-2,6 μm/m
Přímočarost Y	0,5 μm
Přímočarost Z	1,6 μm
Chyba odměřování Y	16,6 μm/m
Chyba odměřování Z	26,2 μm/m
Tolerance polohy	15,2 μm

Tab 20) Hodnoty diagnostiky Ballbaru pro rovinu ZX

	2000 mm/min
Kruhovitost	5,1 μm
Kolmost	7,4 $\mu\text{m}/\text{m}$
Přímočarost Z	0,4 μm
Přímočarost X	0,5 μm
Chyba odměřování Z	23,9 $\mu\text{m}/\text{m}$
Chyba odměřování X	10,4 $\mu\text{m}/\text{m}$
Tolerance polohy	12,1 μm

Volumetrická diagnostika Ballbar (μm)

RENISHAW

Stroj: Kovosvit MAS

Parametry testu

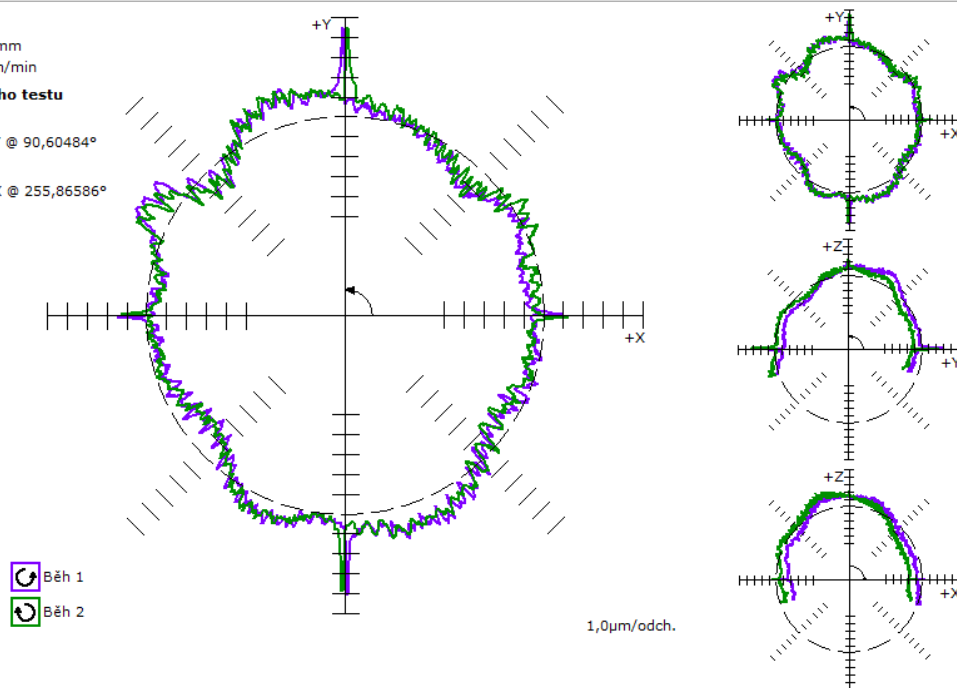
Poloměr 150,0000mm
Posuv 2000,0mm/min

Výsledky volumetrického testu

Max. odchylka 4,5 μm
Rovina XY @ 90,60484°
Min. odchylka -2,4 μm
Rovina ZX @ 255,86586°
Kulovitost 6,9 μm

Kruhovitost

XY 6,3 μm
YZ 5,4 μm
ZX 5,1 μm



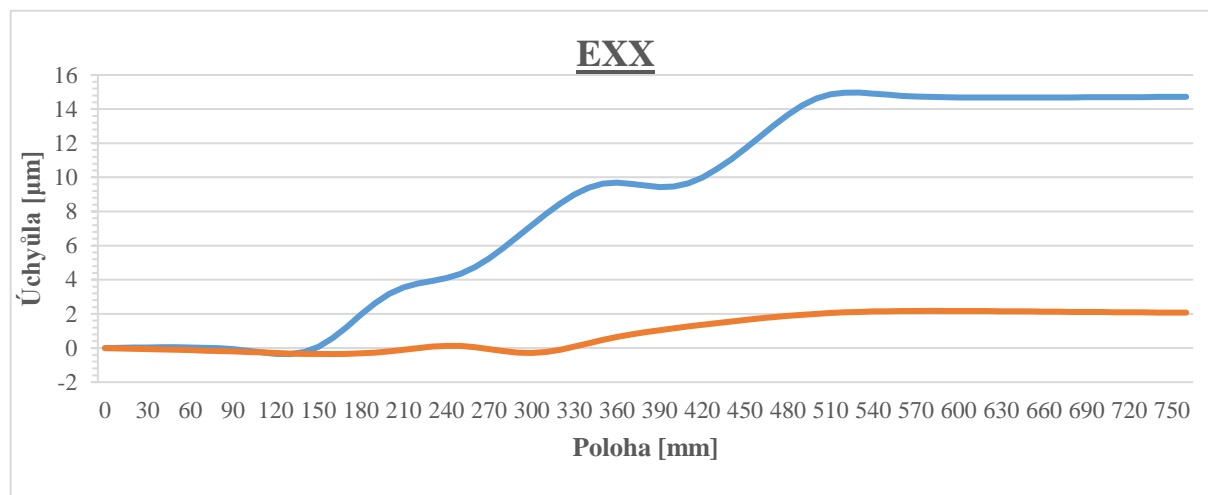
Obr. 28) Volumetrická diagnostika s kompenzací (trigger)

7.3 Porovnání kalibrace s verifikací – trigger

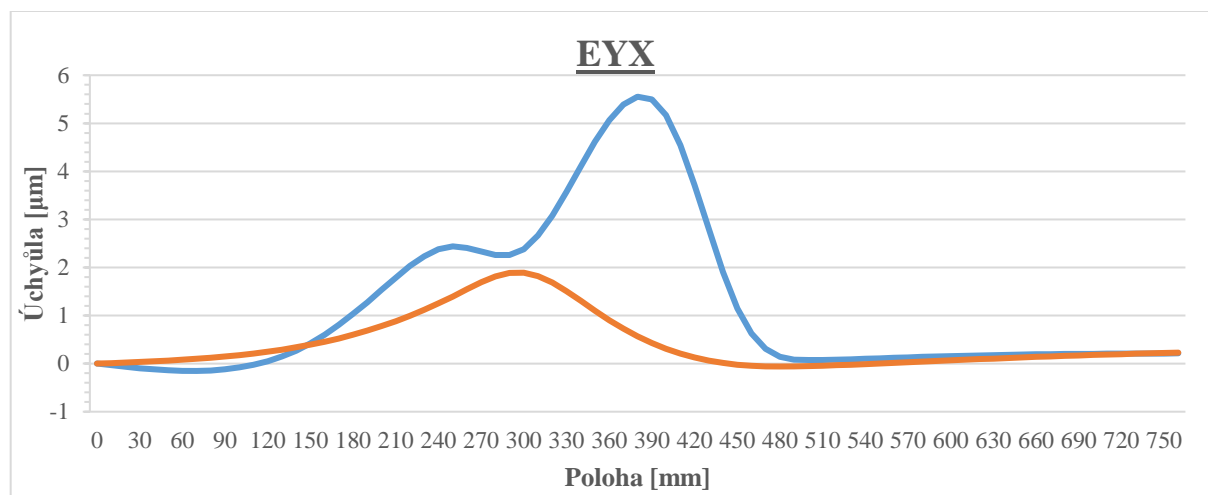
Nyní je třeba posoudit měření kalibrační s měřením verifikačním z obou přístrojů. Při srovnávání dat z LTc porovnáváme data měřená stejným zařízením, což není zcela vhodné, avšak i tyto výsledky mohou obsahovat zajímavé informace. Pro opravdovou kontrolu změny stavu před a po kompenzaci bude sloužit porovnání diagnostiky Ballbaru.

7.3.1 LTc

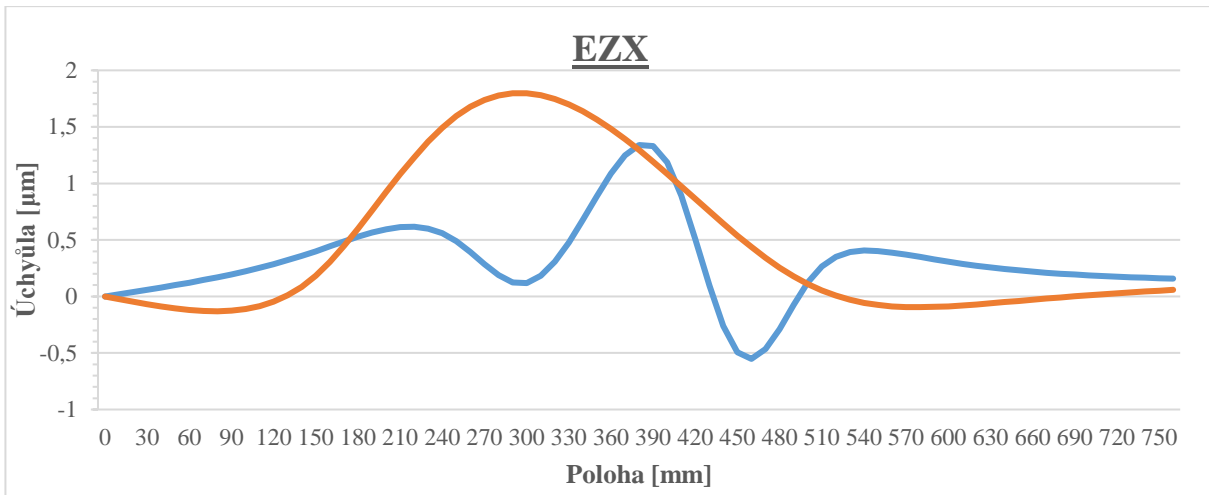
Nejdříve porovnejme vůči sobě průběhy jednotlivých chyb (Obr. 29–46). Modrá křivka vždy patří kalibračnímu měření a červená verifikačnímu.



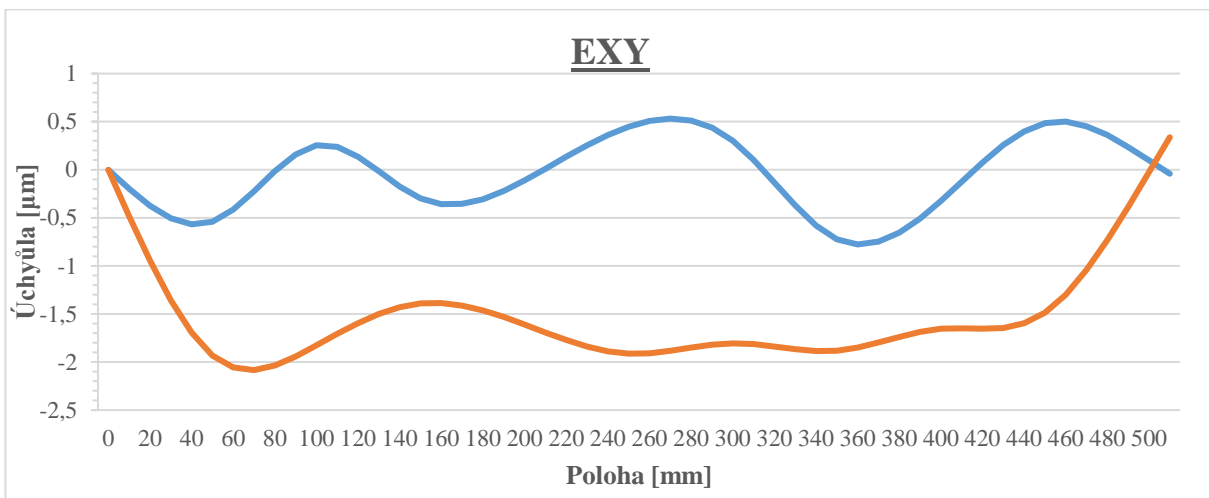
Obr. 29) Graf znázorňující průběhy chyby EXX pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření



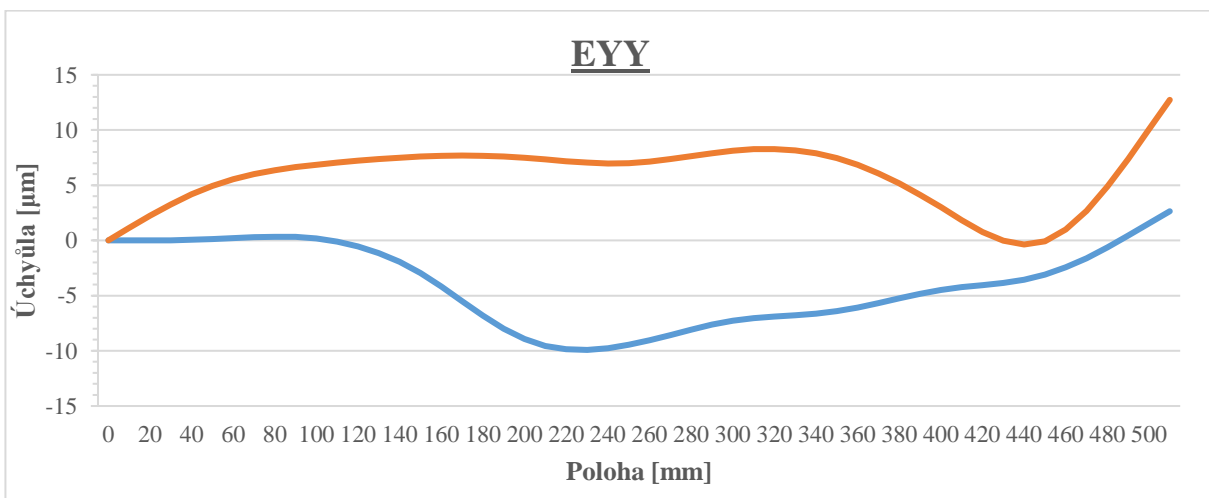
Obr. 30) Graf znázorňující průběhy chyby EYX pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření



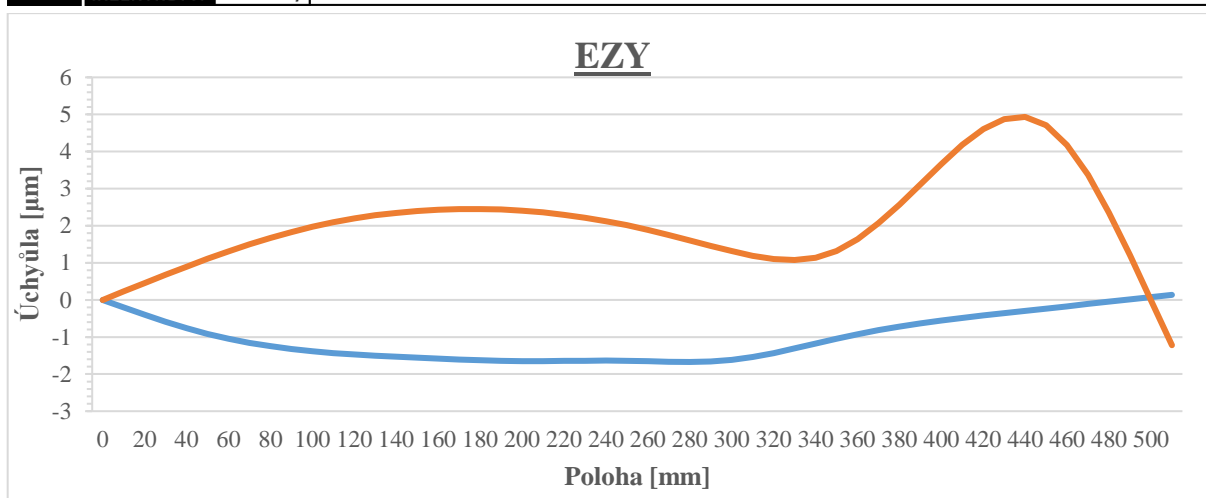
Obr. 31) Graf znázorňující průběhy chyby EZX pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření



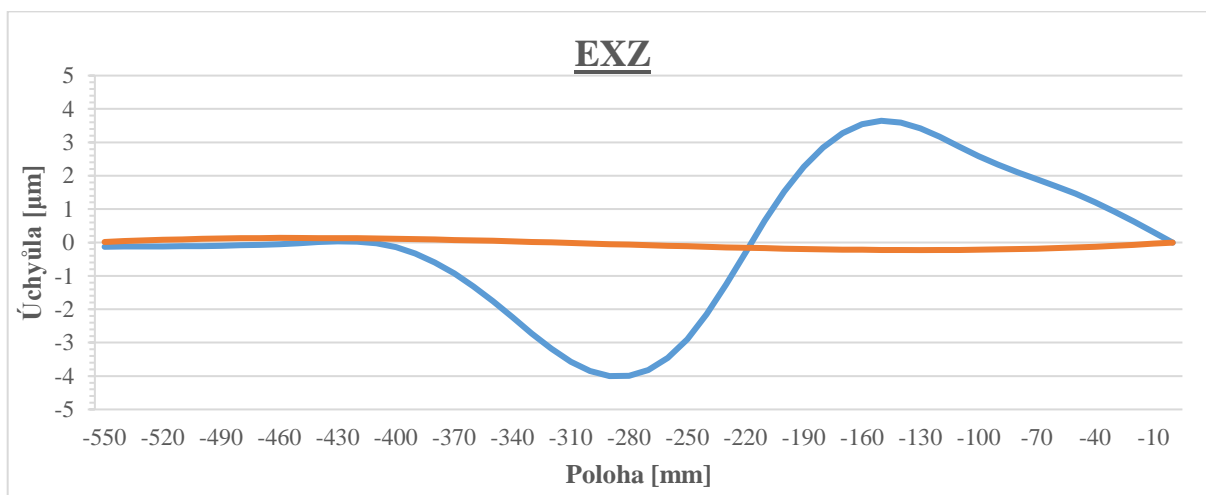
Obr. 32) Graf znázorňující průběhy chyby EXY pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření



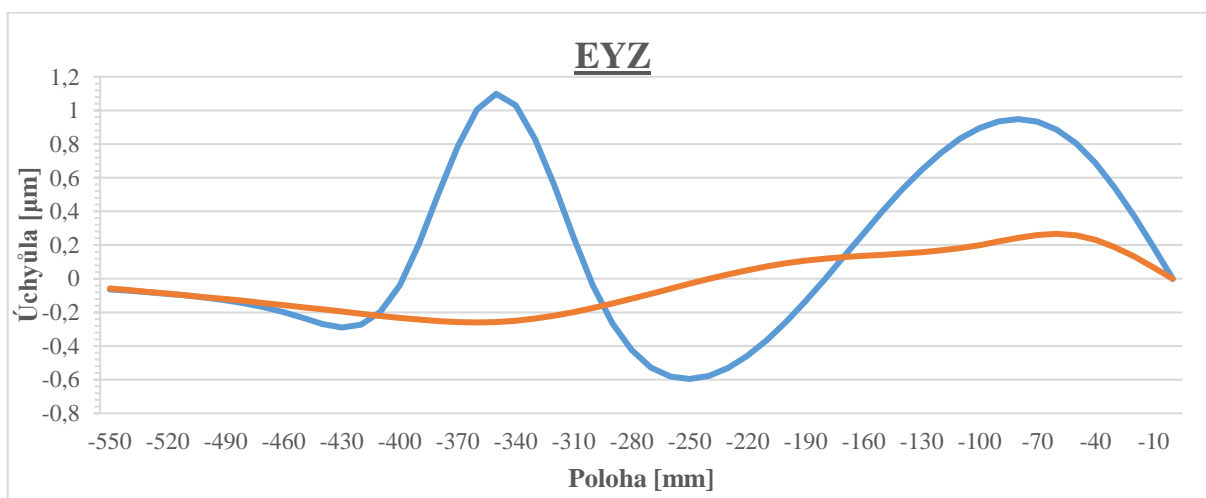
Obr. 33) Graf znázorňující průběhy chyby EYY pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření



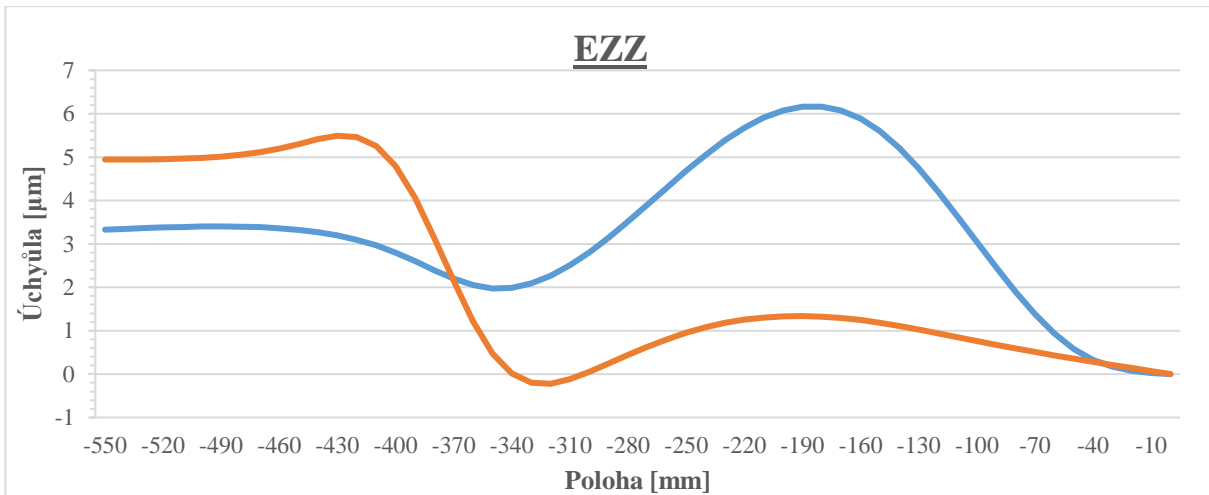
Obr. 34) Graf znázorňující průběhy chyby EZY pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření



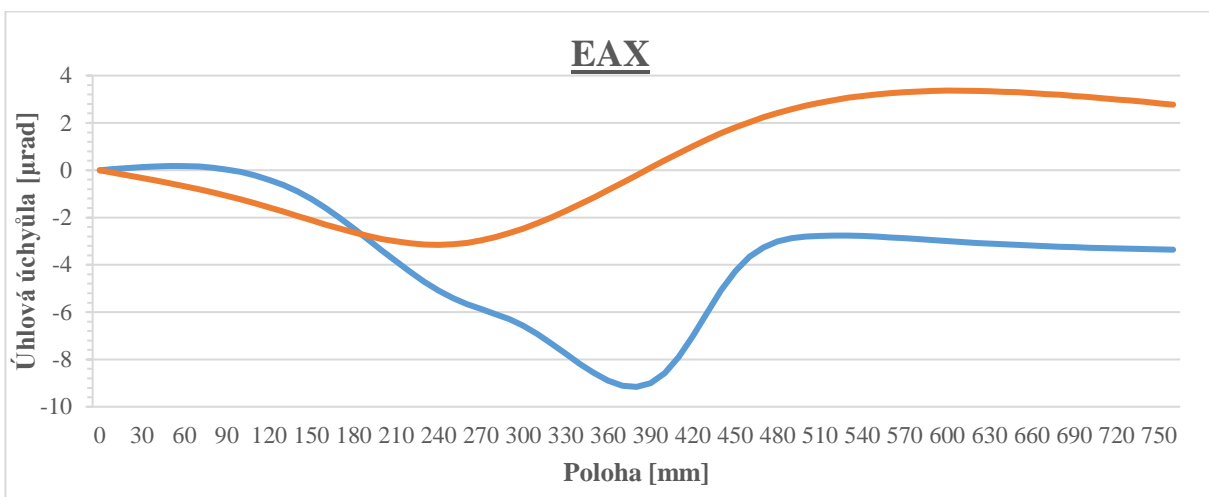
Obr. 35) Graf znázorňující průběhy chyby EXZ pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření



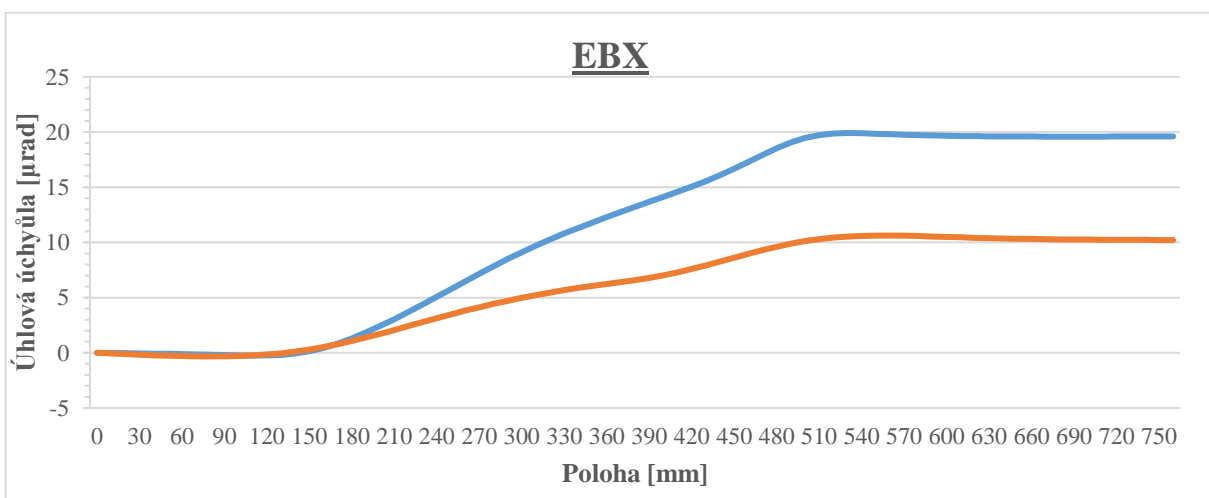
Obr. 36) Graf znázorňující průběhy chyby EZX pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření



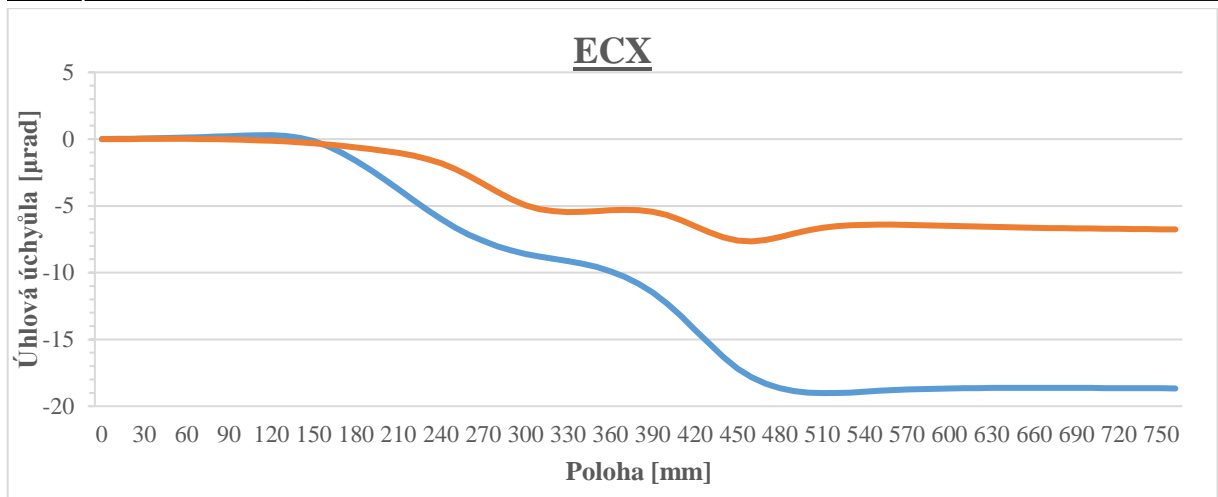
Obr. 37) Graf znázorňující průběhy chyby EZZ pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření



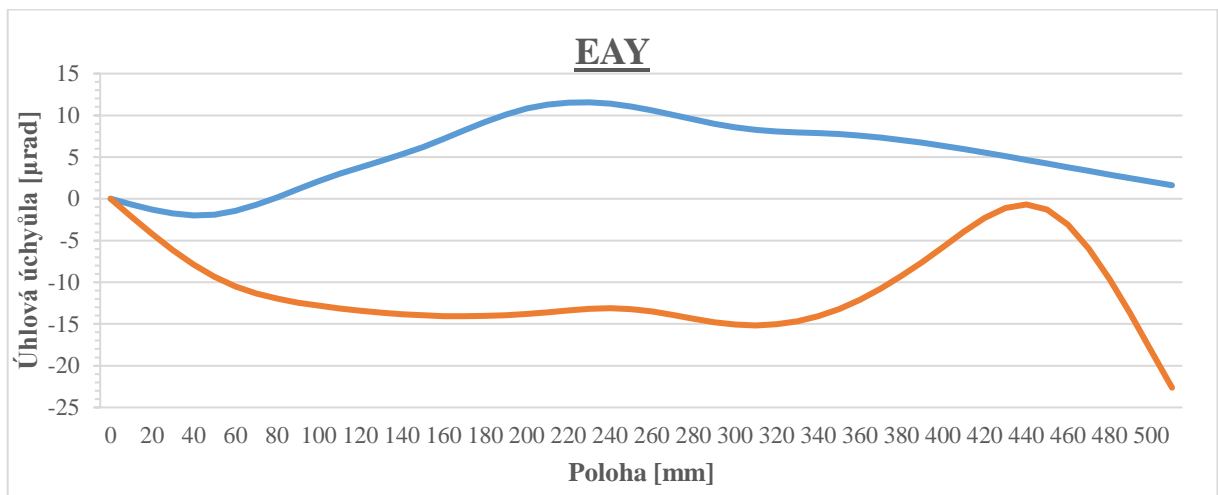
Obr. 38) Graf znázorňující průběhy chyby EAX pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření



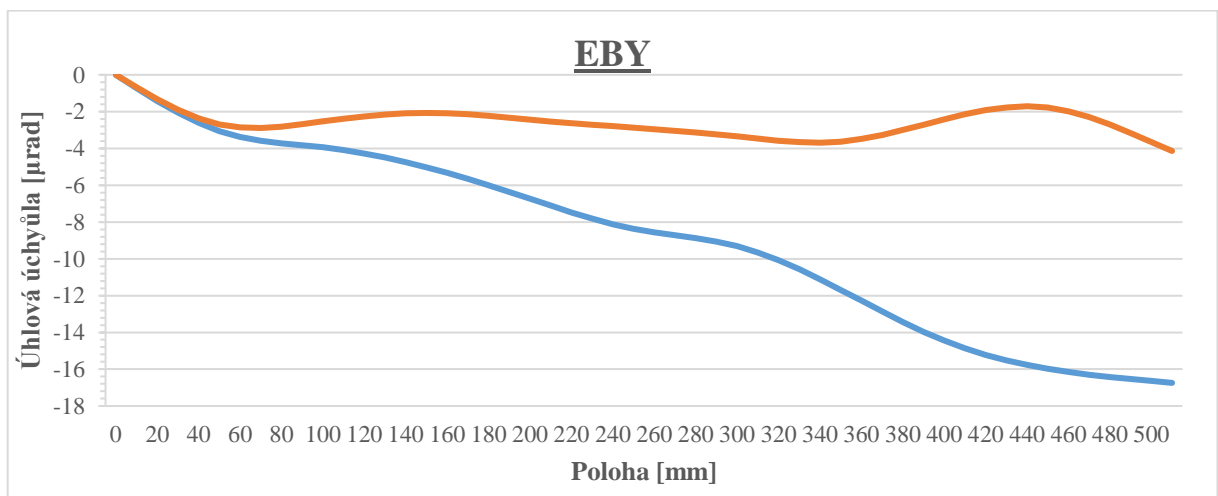
Obr. 39) Graf znázorňující průběhy chyby EBX pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření



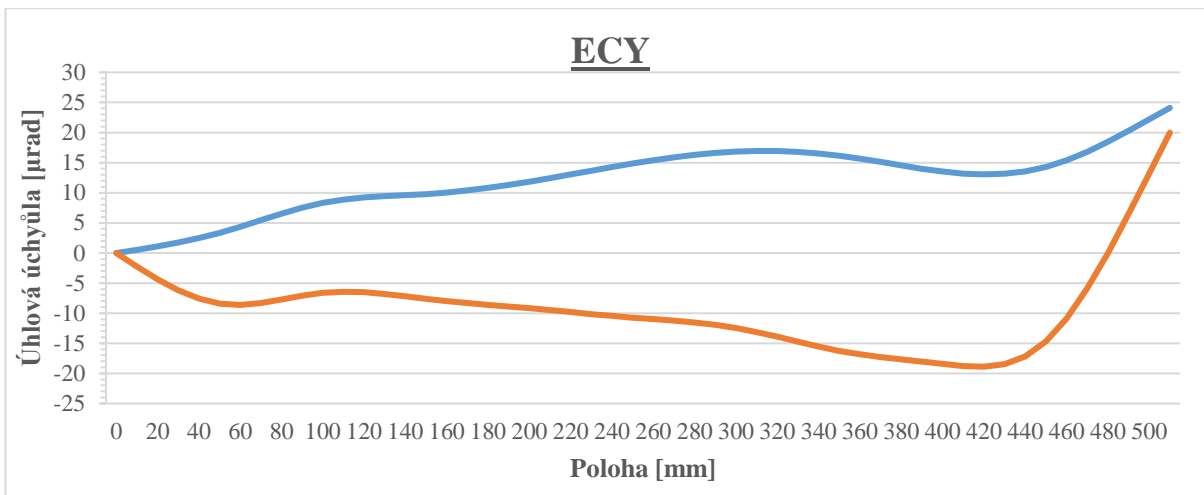
Obr. 40) Graf znázorňující průběhy chyby ECX pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření



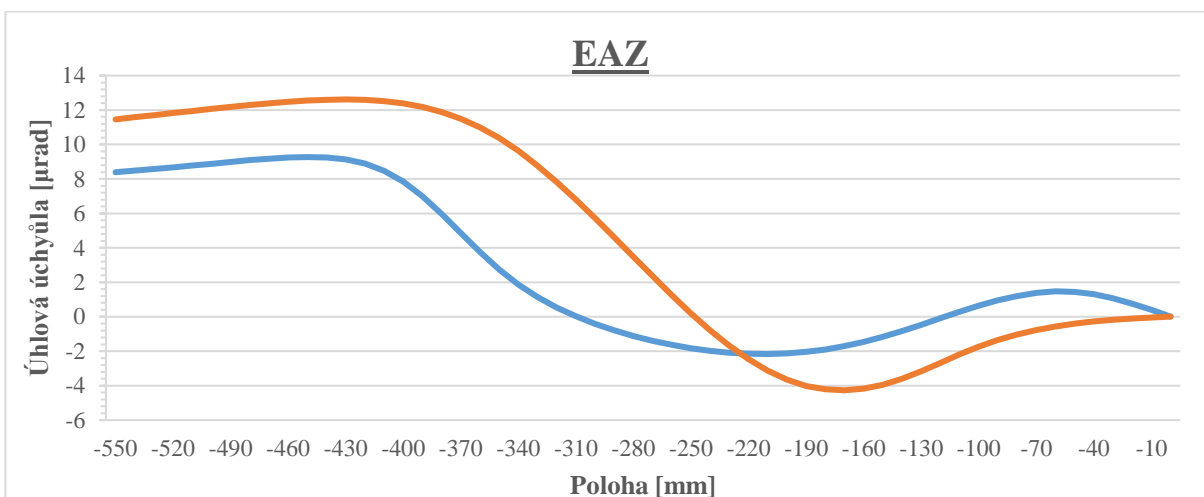
Obr. 41) Graf znázorňující průběhy chyby EAY pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření



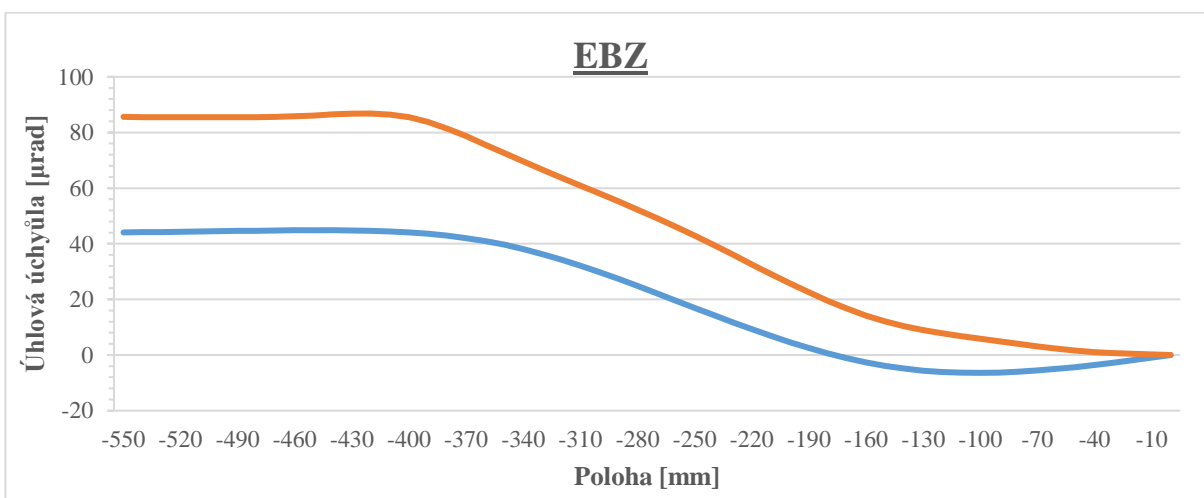
Obr. 42) Graf znázorňující průběhy chyby EBY pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření



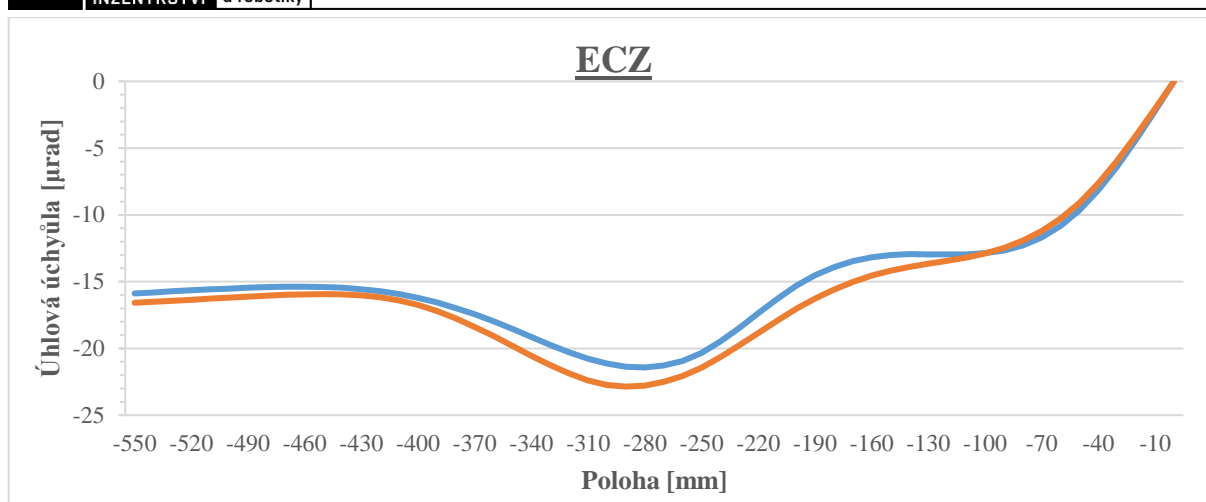
Obr. 43) Graf znázorňující průběhy chyby ECY pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření



Obr. 44) Graf znázorňující průběhy chyby EAZ pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření



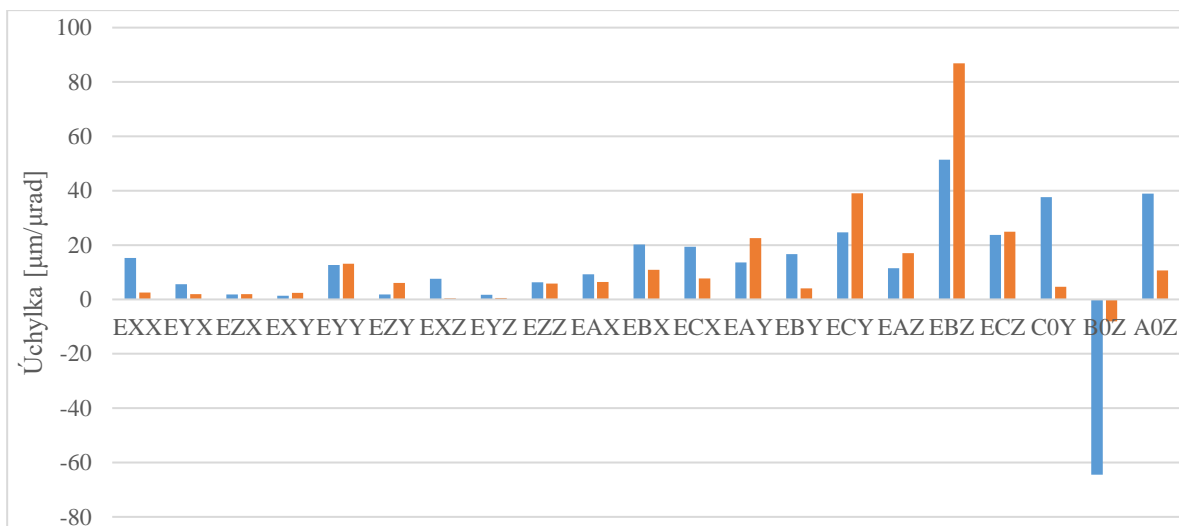
Obr. 45) Graf znázorňující průběhy chyby EBZ pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření



Obr. 46) Graf znázorňující průběhy chyby ECZ pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření

Tab 21) Porovnání odchylek kalibrace a verifikace

Parametr	Odchylka kalibrace	Odchylka verifikace	Rozdíl	
			Absolutní	Procentuální [%]
EXX	15,3 μm	2,5 μm	12,8 μm	83,7
EYX	5,6 μm	2 μm	3,6 μm	64,3
EZX	1,8 μm	2 μm	-0,2 μm	-11,1
EXY	1,3 μm	2,4 μm	-1,1 μm	-84,6
EYY	12,7 μm	13,1 μm	-0,4 μm	-3,1
EZY	1,8 μm	6,1 μm	-4,3 μm	-238,9
EXZ	7,6 μm	0,4 μm	7,2 μm	94,7
EYZ	1,7 μm	0,5 μm	1,2 μm	70,6
EZZ	6,3 μm	5,8 μm	0,5 μm	7,9
EAX	9,2 μrad	6,4 μrad	2,8 μrad	30,4
EBX	20,2 μrad	10,9 μrad	9,3 μrad	46
ECX	19,4 μrad	7,7 μrad	11,7 μrad	60,3
EAY	13,6 μrad	22,6 μrad	-9 μrad	-66,2
EBY	16,7 μrad	4,1 μrad	12,6 μrad	75,4
ECY	24,7 μrad	39,1 μrad	-14,4 μrad	-58,3
EAZ	11,5 μrad	17 μrad	-5,5 μrad	-47,8
EBZ	51,4 μrad	86,9 μrad	-35,5 μrad	-69,1
ECZ	23,7 μrad	24,9 μrad	-1,2 μrad	-5,1
C0Y	37,6 μrad	4,6 μrad	33 μrad	87,8
B0Z	-64,5 μrad	-8,1 μrad	56,4 μrad	87,4
A0Z	38,9 μrad	10,6 μrad	28,3 μrad	72,8



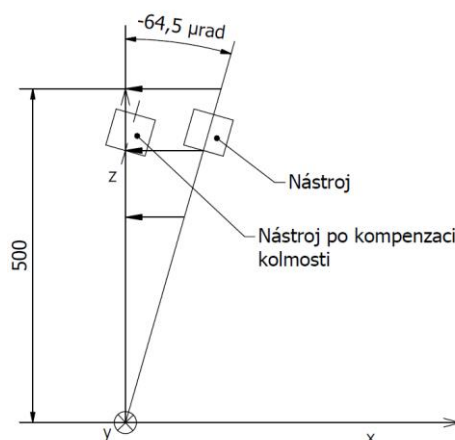
Obr. 47) Grafické znázornění odchylek kalibrace a verifikace

Z tabulky (Tab 21) a grafu (Obr. 47) je patrné, že v některých parametrech došlo ke zhoršení výsledků. Absolutní zhoršení parametrů chyb EZX a EYY je menší, než je nejistota měření. Zhoršení je tedy velmi nepatrné nebo dokonce žádné. Došlo k velkému zlepšení kolmostí. Pro názornost je uvedena rovnice (5) pro výpočet odchylky způsobné chybou kolmosti B0Z na rameni.

$$z \times \tan(B0Z) = \Delta x \quad (5)$$

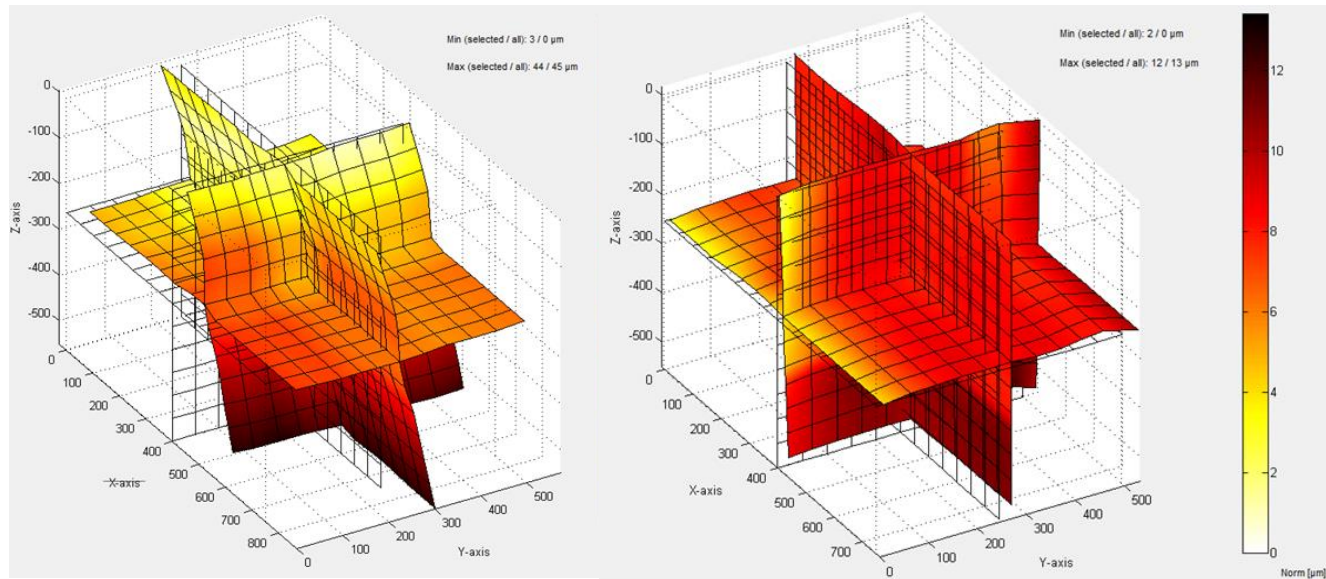
$$500\text{mm} \times \tan(-64,5 \mu\text{rad}) = 0,032 \text{ mm} = 32\mu\text{m} \quad (6)$$

Z rovnice (6) vyplývá že vlivem chyby B0Z bude posunutí na rameni 500 mm, 32 μm . Tedy právě chyby kolmosti, vzhledem k jejich velikosti, budou mít na celkovou volumetrickou přesnost markantní podíl. Přestože je však kolmost dána výrobou a montáží stroje, ke kompenzaci může dojít dorovnáním úchylky pomocí jiné osy. Jak je patrné z obrázku (Obr. 48), nástroj byl původně vyosen chybou kolmosti, po kompenzaci je však kolmost v pořádku. Nyní se ten stejný úhel chová jako chyba rotační, proto možná došlo ve většině případů ke zhoršení rotačních parametrů. V případě pěti-osého stroje by bylo možné natočení způsobené rotačními chybami efektivně dorovnat rotačními osami.



Obr. 48) Znázornění kompenzace kolmosti

Komplexnost a propojení všech parametru nejlépe vystihuje volumetrická chyba. Vektorové mapy obou měření, se stejnou velikostí měřítka deformace, jsou na obrázku (Obr. 50). Maximální úchylka v námi zvoleném prostoru byla před kompenzací 45 μm a minimální 0 μm . V_{xyz} je tedy 45 μm . Po námi vytvořených kompenzacích je maximální odchylka 13 μm a minimální 0 μm . V_{xyz} je rovno 13 μm .



Obr. 49) Vektorová mapa před s po kompenzací

7.3.2 Ballbar

Tab 22) Porovnání hodnot diagnostiky Ballbaru pro rovinu XY

	Bez kompenzace	S kompenzací	Rozdíl	
			Absolutní	Procentuální [%]
Kruhovitost	9,1 μm	6,4 μm	2,7 μm	29,6
Kolmost	20,2 $\mu\text{m}/\text{m}$	5 $\mu\text{m}/\text{m}$	15,2 $\mu\text{m}/\text{m}$	75,2
Přímočarost X	-3,6 μm	1 μm	2,6 μm	72,2
Přímočarost Y	-1,1 μm	0,1 μm	1 μm	91
Chyba odměřování X	35,2 $\mu\text{m}/\text{m}$	6,1 $\mu\text{m}/\text{m}$	29,1 $\mu\text{m}/\text{m}$	82
Chyba odměřování Y	-0,6 $\mu\text{m}/\text{m}$	11,6 $\mu\text{m}/\text{m}$	-11 $\mu\text{m}/\text{m}$	-1833
Tolerance polohy	25,9 μm	9,8 μm	16,1 μm	62,1

Tab 23) Porovnání hodnot diagnostiky Ballbaru pro rovinu YZ

	Bez kompenzace	S kompenzací	Rozdíl	
			Absolutní	Procentuální [%]
Kruhovitost	11,9 μm	5,5 μm	6,4 μm	53,8
Kolmost	57,2 $\mu\text{m}/\text{m}$	-2,6 $\mu\text{m}/\text{m}$	54,6 $\mu\text{m}/\text{m}$	95,45
Přímočarost Y	1,2 μm	0,5 μm	0,7 μm	58,3
Přímočarost Z	0,2 μm	1,6 μm	-1,4 μm	-700
Chyba odměřování Y	8,4 $\mu\text{m}/\text{m}$	16,6 $\mu\text{m}/\text{m}$	-8,2 $\mu\text{m}/\text{m}$	-97,6
Chyba odměřování Z	34,2 $\mu\text{m}/\text{m}$	26,2 $\mu\text{m}/\text{m}$	8 $\mu\text{m}/\text{m}$	23,4
Tolerance polohy	27,5 μm	15,2 μm	12,3 μm	44,7

Tab 24) Porovnání hodnot diagnostiky Ballbaru pro rovinu ZX

	Bez kompenzace	S kompenzací	Rozdíl	
			Absolutní	Procentuální [%]
Kruhovitost	11 μm	5,1 μm	5,9 μm	53,6
Kolmost	56 $\mu\text{m}/\text{m}$	7,4 $\mu\text{m}/\text{m}$	48,6 $\mu\text{m}/\text{m}$	86,8
Přímočarost Z	12,5 μm	0,4 μm	12,1 μm	96,8
Přímočarost X	0,3 μm	0,5 μm	-0,2 μm	-66,7
Chyba odměřování Z	43,6 $\mu\text{m}/\text{m}$	23,9 $\mu\text{m}/\text{m}$	19,7 $\mu\text{m}/\text{m}$	45,2
Chyba odměřování X	38,5 $\mu\text{m}/\text{m}$	10,4 $\mu\text{m}/\text{m}$	28,1 $\mu\text{m}/\text{m}$	73
Tolerance polohy	50,9 μm	12,1 μm	38,8 μm	76,2

Dle porovnání výsledků diagnostiky Ballbaru hodnotím kalibraci velice kladně. Došlo ke zhoršení odměřování Y v rovině XY a YZ, to může být důsledkem snahy kalibrace o vyrovnání elipsovitého tvaru kruhového pohybu. Tedy stažení chyby jedné osy (X a Z), ale zhoršení druhé (Y). U přímočarosti Z v rovině YZ došlo sice k velké procentuální změně, avšak ta je zapříčiněna zejména malou původní hodnotou, absolutní rozdíl je na hranici nejistoty Ballbaru, proto toto zhoršení nepovažujeme za relevantní. Stejný závěr platí i pro přímočarost X v rovině ZY.

8 VYHODNOCENÍ ON-THE-FLY

Stejně vyhodnocení provedeme i pro druhou metodu, tedy on-the-fly.

8.1 Kalibrační měření

Opět změříme stroj bez zapnutých kalibračních hodnot. Následují výsledky rozsahů odchylek, časové a teplotní údaje (Tab 25–26).

8.1.1 LTc

Tab 25) Výsledky rozsahů úchylek před kompenzacemi

Parametr	Úchylka	Nejistota (95%)
EXX	16,1 μm	0,2 μm
EYX	6,4 μm	0,6 μm
EZX	1,1 μm	0,3 μm
EXY	2,7 μm	0,2 μm
EYY	17,9 μm	0,5 μm
EZY	1,4 μm	0,2 μm
EXZ	8,4 μm	0,1 μm
EYZ	3,4 μm	0,1 μm
EZZ	6,3 μm	0,3 μm
EAX	8 μrad	1,3 μrad
EBX	21,2 μrad	0,5 μrad
ECX	20,2 μrad	0,3 μrad
EAY	14,6 μrad	1,1 μrad
EBY	21,0 μrad	0,3 μrad
ECY	32,2 μrad	1,4 μrad
EAZ	6,8 μrad	1,2 μrad
EBZ	70,4 μrad	1,1 μrad
ECZ	13,5 μrad	0,7 μrad
C0Y	40,2 μrad	0,7 μrad
B0Z	-71,3 μrad	0,6 μrad
A0Z	48,9 μrad	0,3 μrad

Tab 26) Tabulka postupu měření s jednotlivými časy a teplotami

Pozice	Datum	Start	Konec	Trvání	Trvání po optimalizaci	Teplota start [°C]	Teplota konec [°C]	Teplotní drift [°C]	Gradient [°C/h]	Průměr [°C]
6	2.5.2017	9:40	9:48	0:08	0:04	20,62	20,6	0,02	0,15	20,6
5	2.5.2017	10:19	10:30	0:11	0:06	20,9	21	0,1	0,75	20,9
4	2.5.2017	11:30	11:43	0:13	0:07	21,5	21,65	0,15	1,125	21,6
2	2.5.2017	11:53	12:03	0:10	0:05	21,57	21,36	0,21	1,575	21,5
1	2.5.2017	12:15	12:24	0:09	0:05	21,6	21,37	0,23	1,725	21,5
3	2.5.2017	12:31	12:43	0:12	0:06	21,57	21,66	0,09	0,675	21,6
				1:03	0:33					

Tabulka postupu měření (Tab. 26) obsahuje, na rozdíl od stejných tabulek u metody trigger, i sloupec *Trvání po optimalizaci*. Ten obsahuje teoretickou hodnotu doby měření po optimalizaci (viz kapitola 6.2.2). Úplné optimalizace se nám nepodařilo dosáhnout, proto docházelo k častým opakováním měření poloh, a tedy i k prodloužení doby měření.

8.1.2 Ballbar

Pro porovnání využijeme hodnoty z měření v kapitole 7.1.2.

8.2 Verifikační měření

Pro porovnání uskutečnime i verifikační měření.

8.2.1 LTc

Následují výsledky rozsahů odchylek, časové a teplotní údaje (Tab 27–28).

Tab 27) Výsledky rozsahů úchylek s kompenzacemi

Parametr	Úchylka	Nejistota (95%)
EXX	1,9 μm	0,2 μm
EYX	2,1 μm	0,5 μm
EZX	1,2 μm	0,3 μm
EXY	1,8 μm	0,2 μm
EYY	3,7 μm	0,5 μm
EZY	1,4 μm	0,3 μm
EXZ	1,5 μm	0,1 μm
EYZ	1,4 μm	0,1 μm
EZZ	5,8 μm	0,3 μm
EAX	3,1 μrad	1,3 μrad
EBX	7 μrad	0,4 μrad
ECX	3,5 μrad	0,3 μrad
EAY	4,6 μrad	1,3 μrad
EBY	3,1 μrad	0,3 μrad
ECY	24 μrad	1,4 μrad
EAZ	11,5 μrad	1,1 μrad
EBZ	63,2 μrad	1,1 μrad
ECZ	22,6 μrad	0,7 μrad
C0Y	-7,4 μrad	0,8 μrad
B0Z	4,7 μrad	0,6 μrad
A0Z	-4,9 μrad	0,4 μrad

Tab 28) Tabulka postupu měření s jednotlivými časy a teplotami

Pozice	Datum	Start	Konec	Trvání	Trvání po optimalizaci	Teplota start [°C]	Teplota konec [°C]	Teplotní drift [°C]	Gradient [°C/h]	Průměr [°C]
3	02.05.2017	13:03	13:16	0:12	0:04	21,54	21,58	0,04	0,3	21,6
1	02.05.2017	14:24	14:35	0:10	0:06	21,53	21,51	0,02	0,15	21,5
2	02.05.2017	14:57	15:09	0:12	0:07	21,96	21,82	0,14	1,05	21,9
5	02.05.2017	15:12	15:21	0:09	0:05	21,95	21,92	0,03	0,225	21,9
6	02.05.2017	15:25	15:43	0:17	0:05	21,83	22,03	0,2	1,5	21,9
4	02.05.2017	16:16	16:30	0:14	0:06	22,86	22,37	0,49	3,675	22,6
				1:18:00	0:33					

8.2.2 Ballbar

Toto měření probíhalo při teplotě 21,5 °C. Výsledky hodnoty udávají tabulky (Tab 29–31) a graf (Obr.50).

Tab 29) Hodnoty diagnostiky Ballbaru pro rovinu XY

	2000 mm/min
Kruhovitost	6,4 μm
Kolmost	5 $\mu\text{m/m}$
Přímocharost X	0,6 μm
Přímocharost Y	-0,2 μm
Chyba odměřování X	9,5 $\mu\text{m/m}$
Chyba odměřování Y	8,9 $\mu\text{m/m}$
Tolerance polohy	9 μm

Tab 30) Hodnoty diagnostiky Ballbaru pro rovinu YZ

	2000 mm/min
Kruhovitost	5,8 μm
Kolmost	-0,5 $\mu\text{m/m}$
Přímocharost Y	-1,4 μm
Přímocharost Z	1,1 μm
Chyba odměřování Y	11 $\mu\text{m/m}$
Chyba odměřování Z	19,2 $\mu\text{m/m}$
Tolerance polohy	11 μm

Tab 31) Hodnoty diagnostiky Ballbaru pro rovinu ZX

	2000 mm/min
Kruhovitost	6,3 μm
Kolmost	10,7 $\mu\text{m/m}$
Přímocharost Z	0,9 μm
Přímocharost X	-2,3 μm
Chyba odměřování Z	22,6 $\mu\text{m/m}$
Chyba odměřování X	8,2 $\mu\text{m/m}$
Tolerance polohy	12,5 μm

Volumetrická diagnostika Ballbar (μm)



Stroj: Kovosvit MAS

Parametry testu

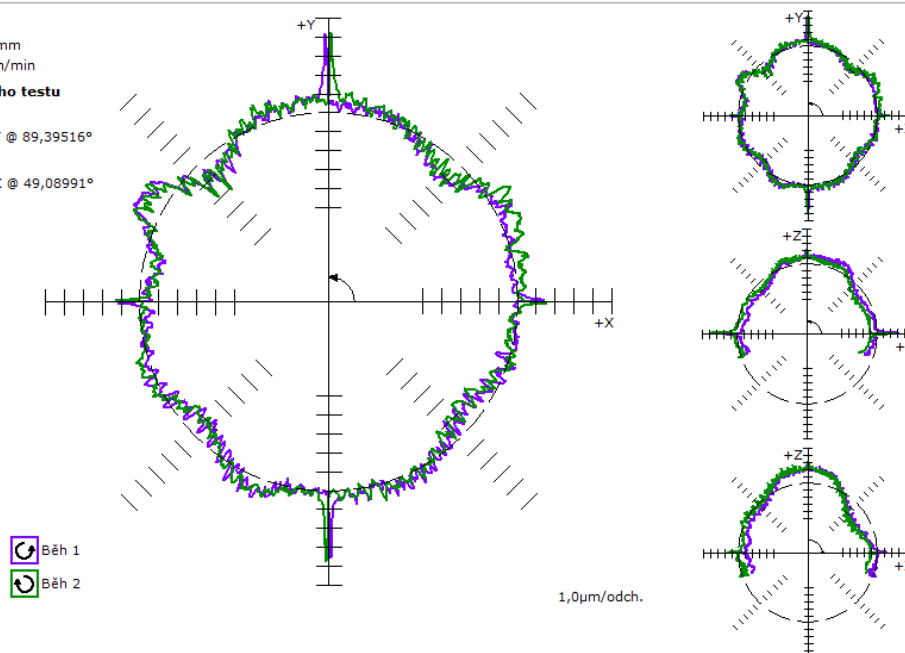
Poloměr 150,0000mm
 Posuv 2000,0mm/min

Výsledky volumetrického testu

Max. odchylka 4,3 μm
 Rovina XY @ 89,39516°
 Min. odchylka -3,1 μm
 Rovina ZX @ 49,08991°
 Kulovitost 7,4 μm

Kruhovitost

XY 6,4 μm
 YZ 5,8 μm
 ZX 6,3 μm

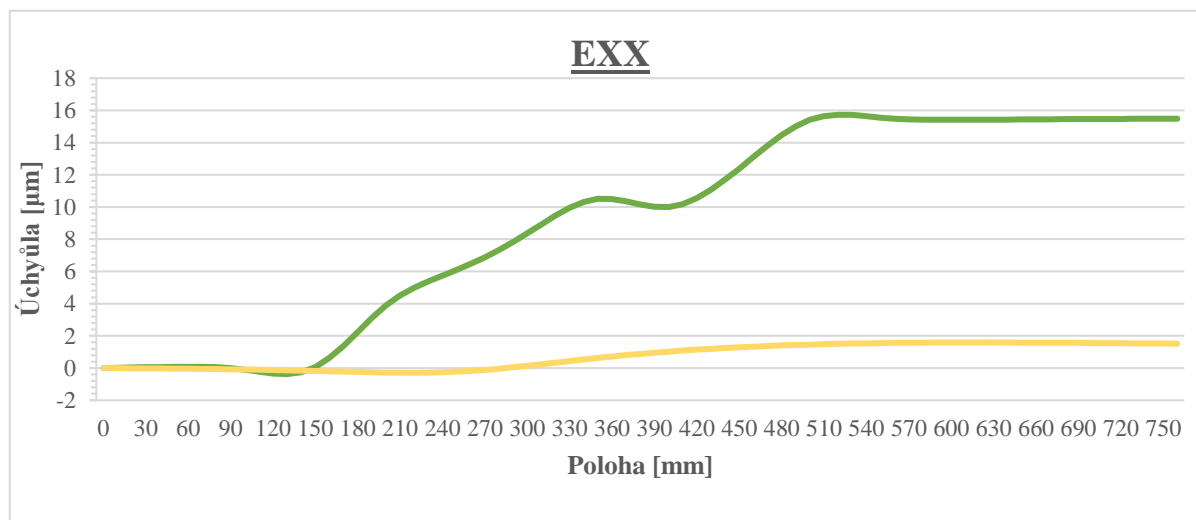


Obr. 50) Volumetrická diagnostika s kompenzací (on-the-fly)

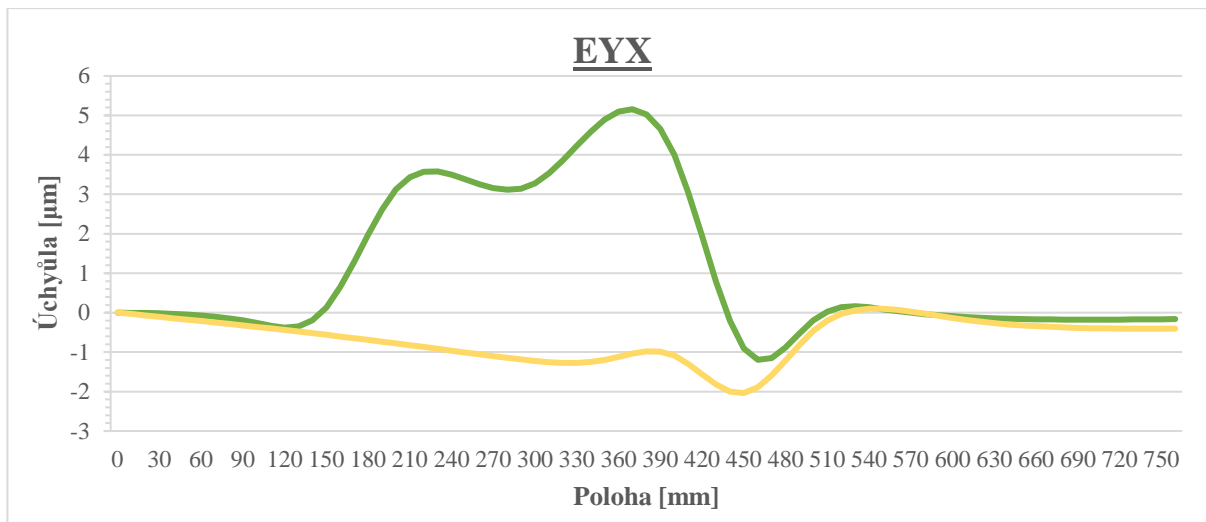
8.3 Porovnání kalibrace s verifikací – on-the-fly

8.3.1 LTC

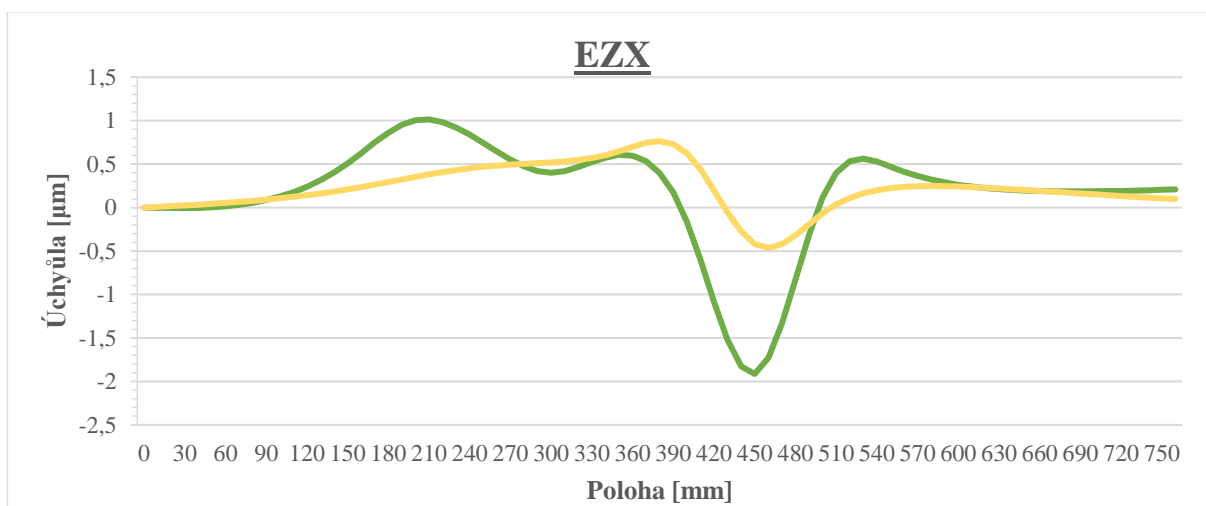
Nejdříve vzájemně porovnáme průběhy jednotlivých chyb (Obr. 51–68). Zelená křivka vždy patří kalibračnímu měření a žlutá verifikačnímu.



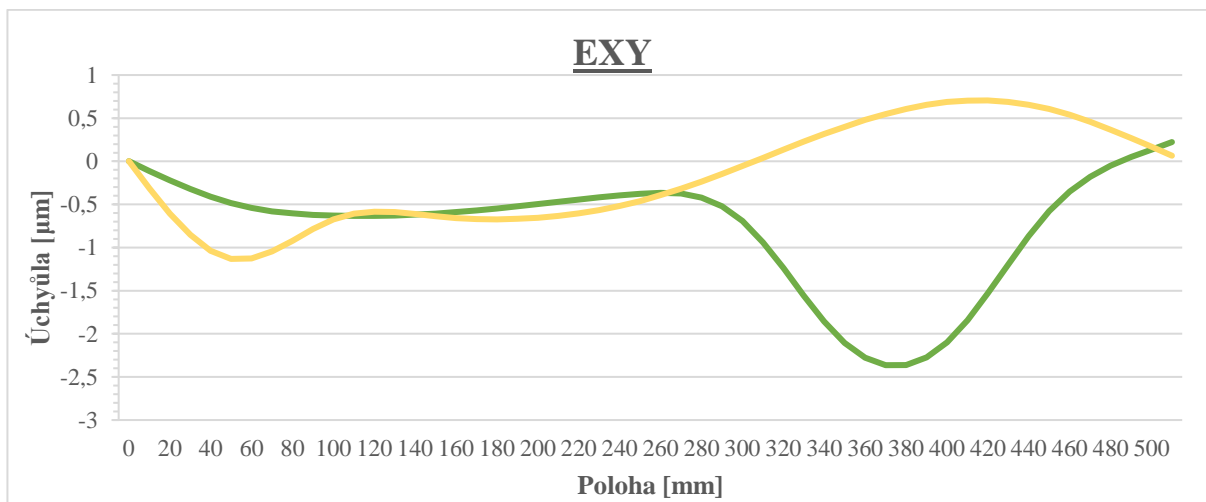
Obr. 51) Graf znázorňující průběhy chyby EXX pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření



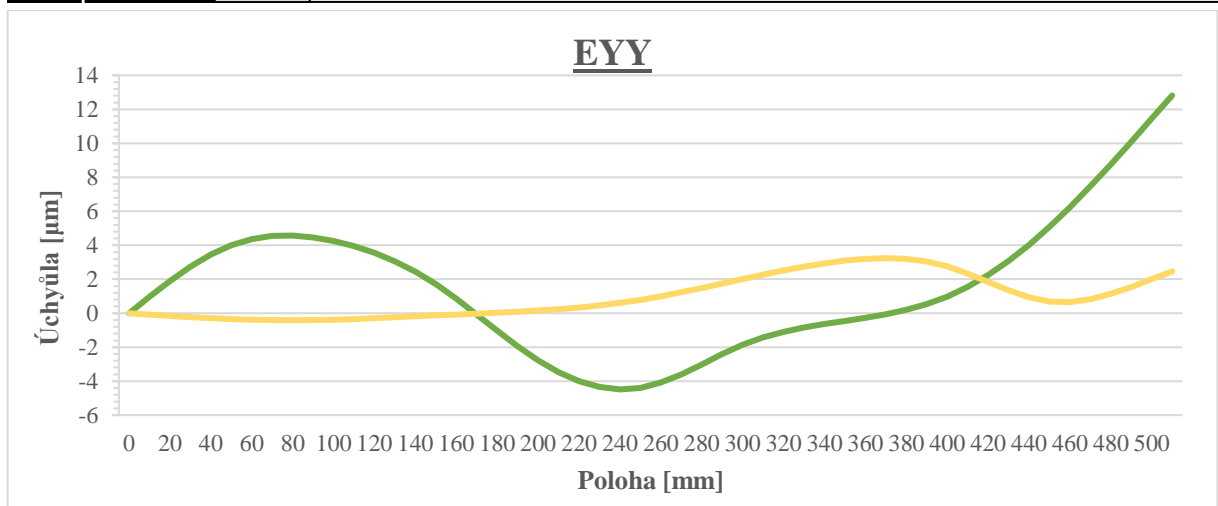
Obr. 52) Graf znázorňující průběhy chyby EYX pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření



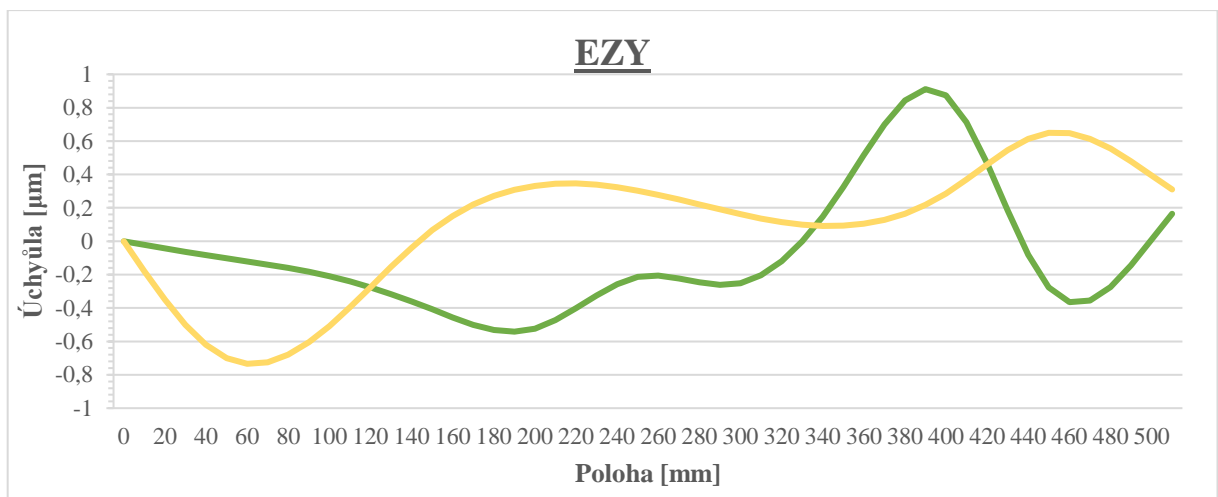
Obr. 53) Graf znázorňující průběhy chyby EZX pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření



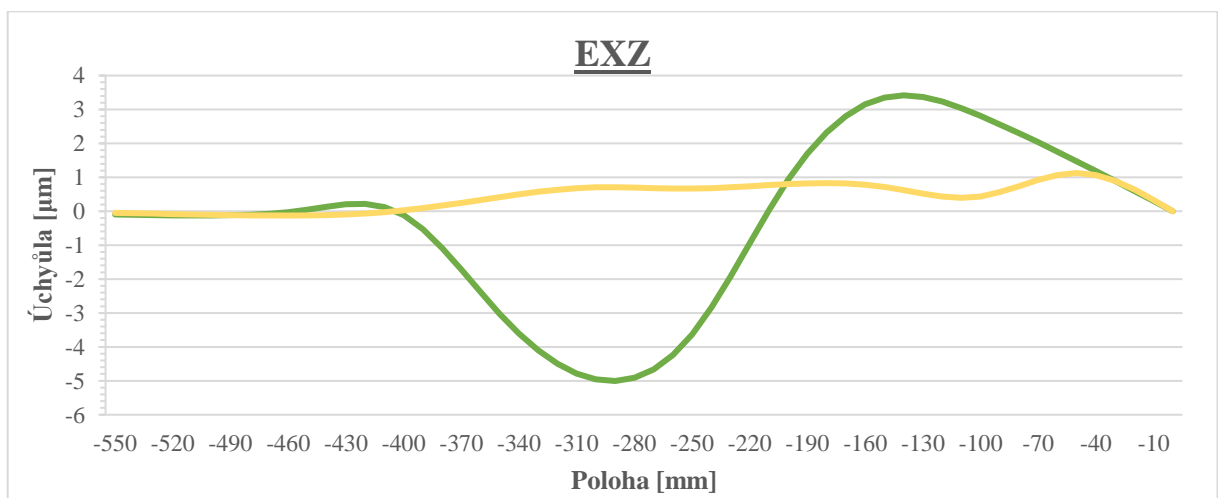
Obr. 54) Graf znázorňující průběhy chyby EXY pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření



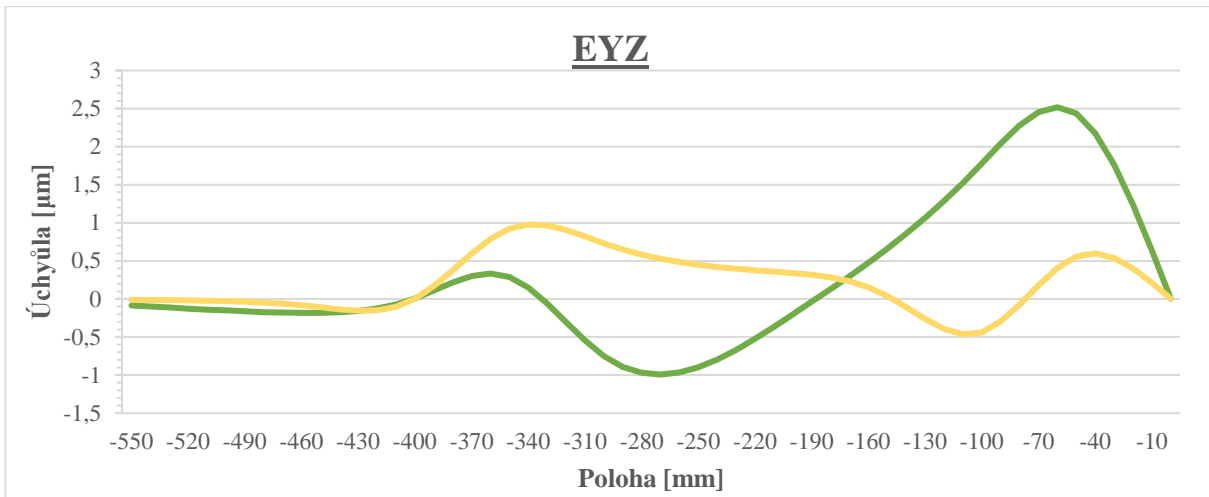
Obr. 55) Graf znázorňující průběhy chyby EYY pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření



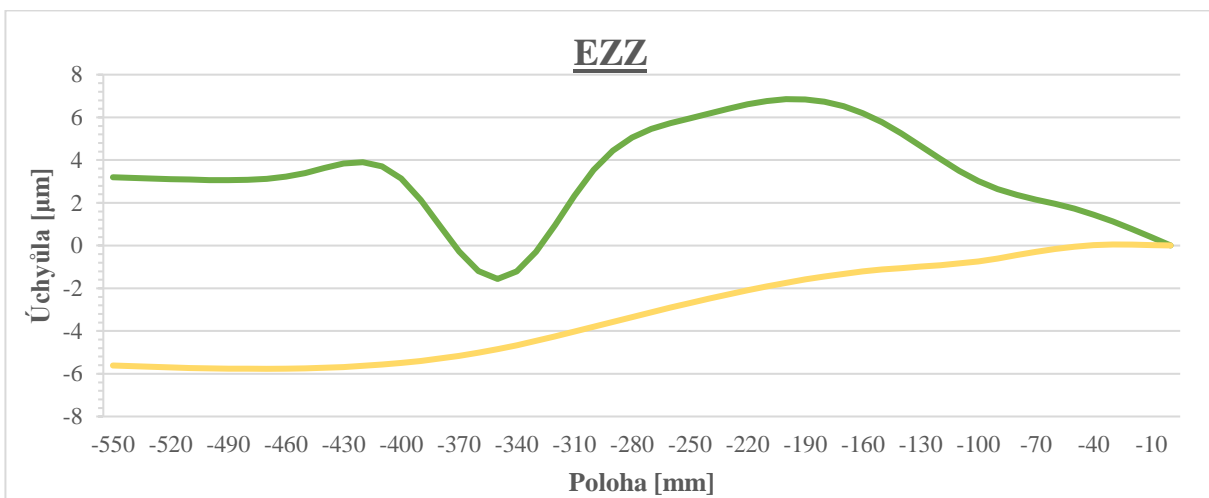
Obr. 56) Graf znázorňující průběhy chyby EZY pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření



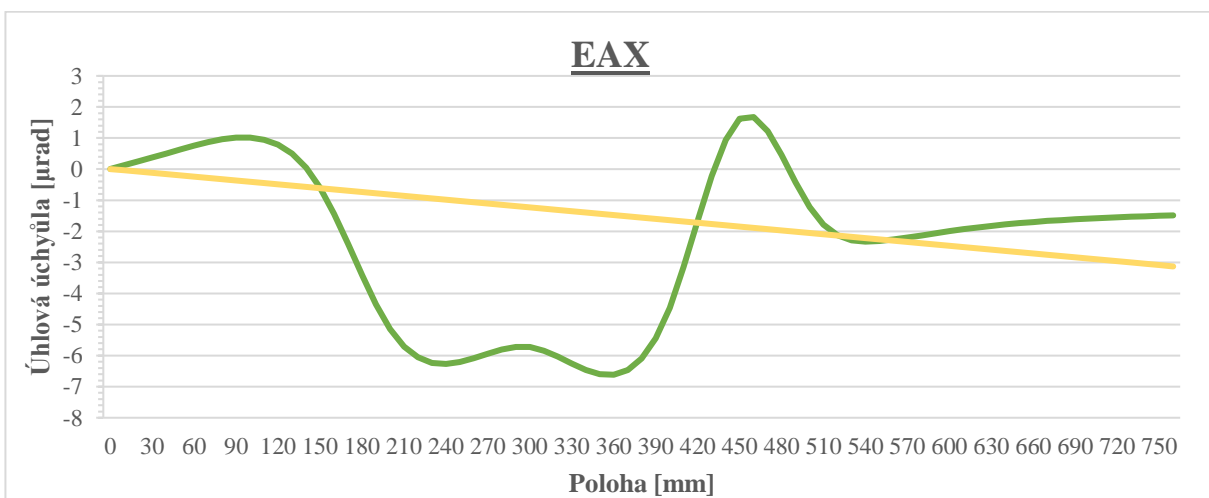
Obr. 57) Graf znázorňující průběhy chyby EXZ pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření



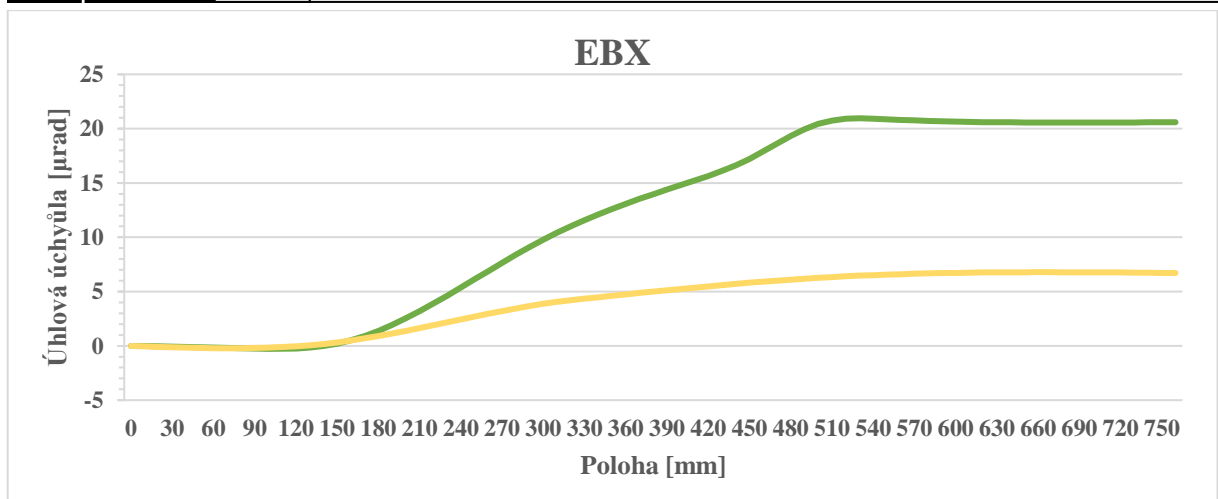
Obr. 58) Graf znázorňující průběhy chyby EYZ pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření



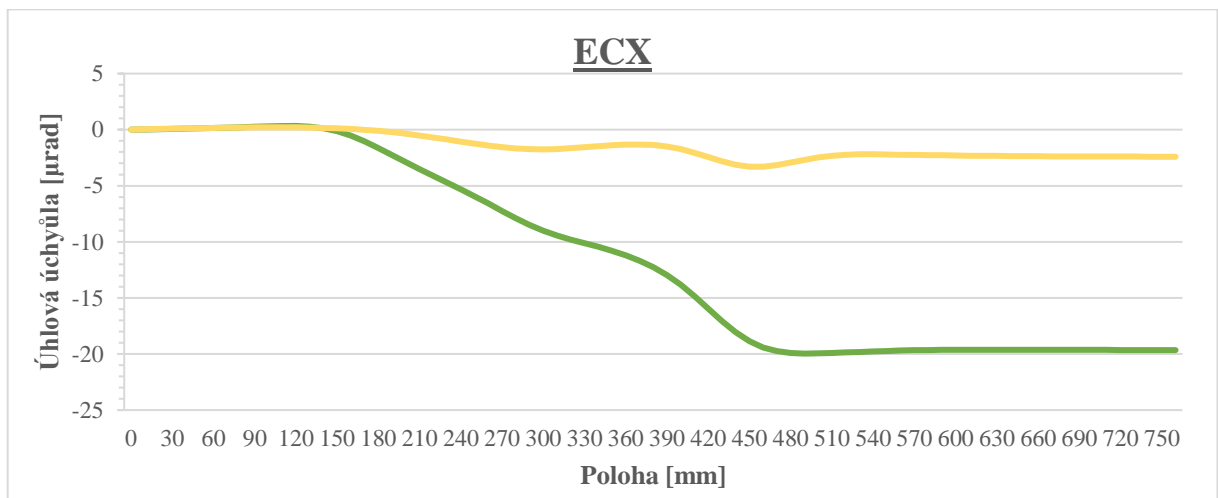
Obr. 59) Graf znázorňující průběhy chyby EZZ pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření



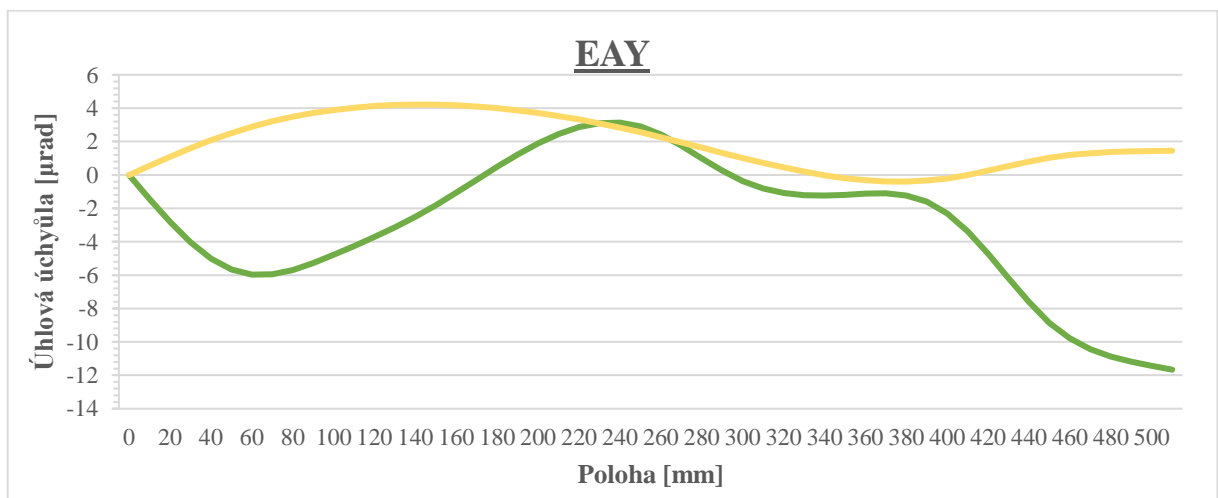
Obr. 60) Graf znázorňující průběhy chyby EAX pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření



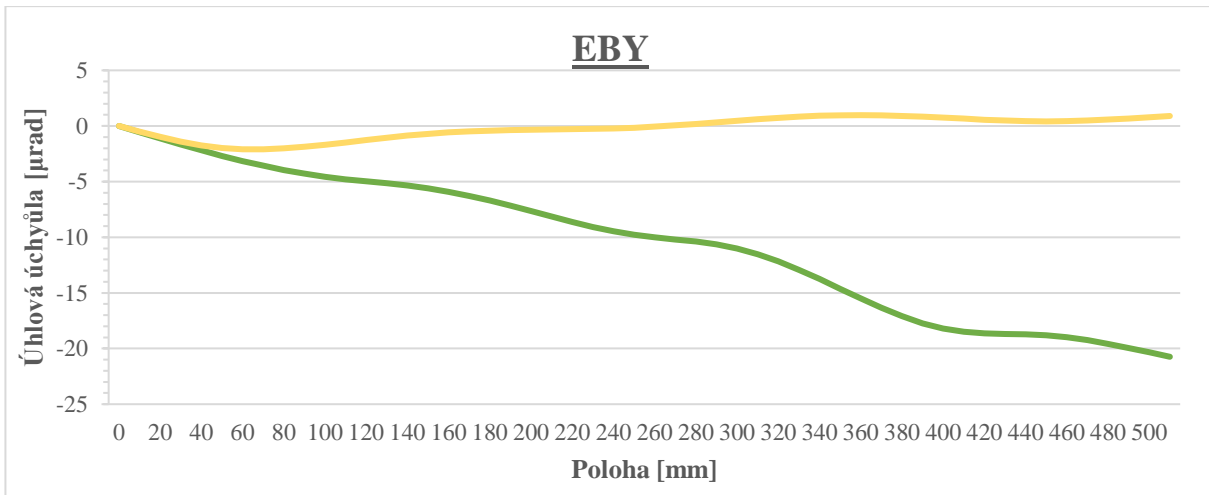
Obr. 61) Graf znázorňující průběhy chyby EBX pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření



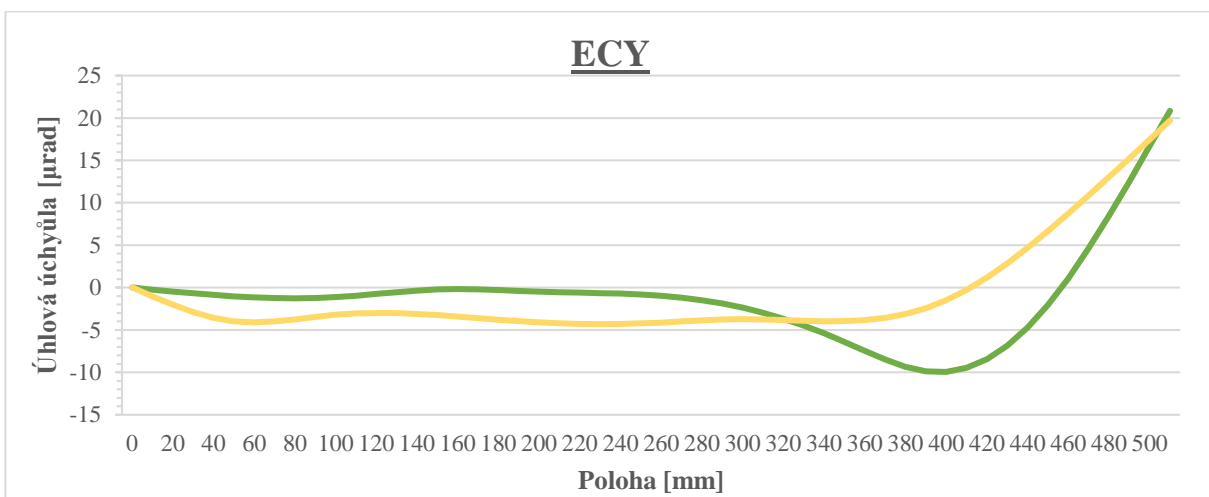
Obr. 62) Graf znázorňující průběhy chyby ECX pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření



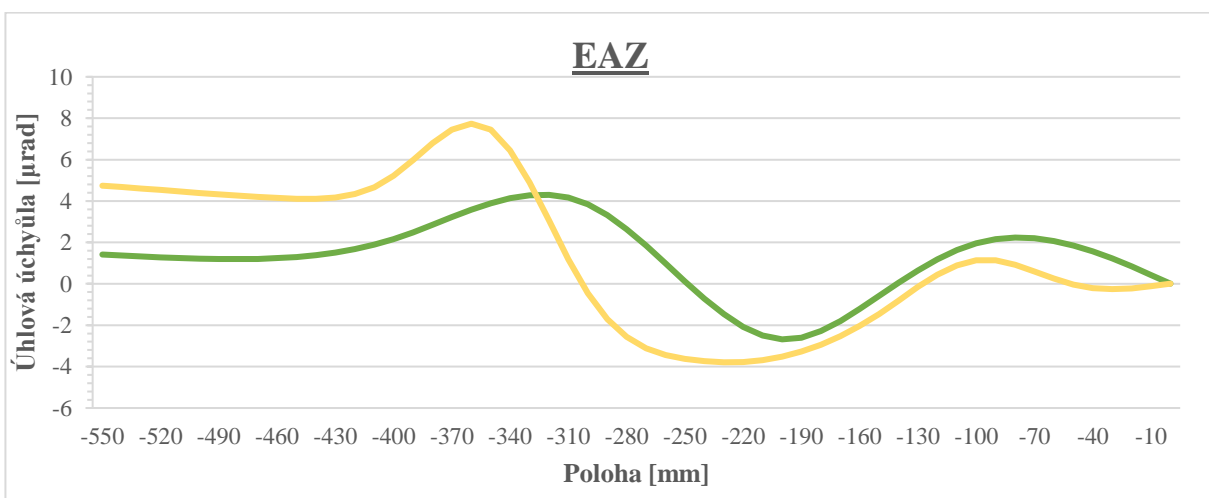
Obr. 63) Graf znázorňující průběhy chyby EAY pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření



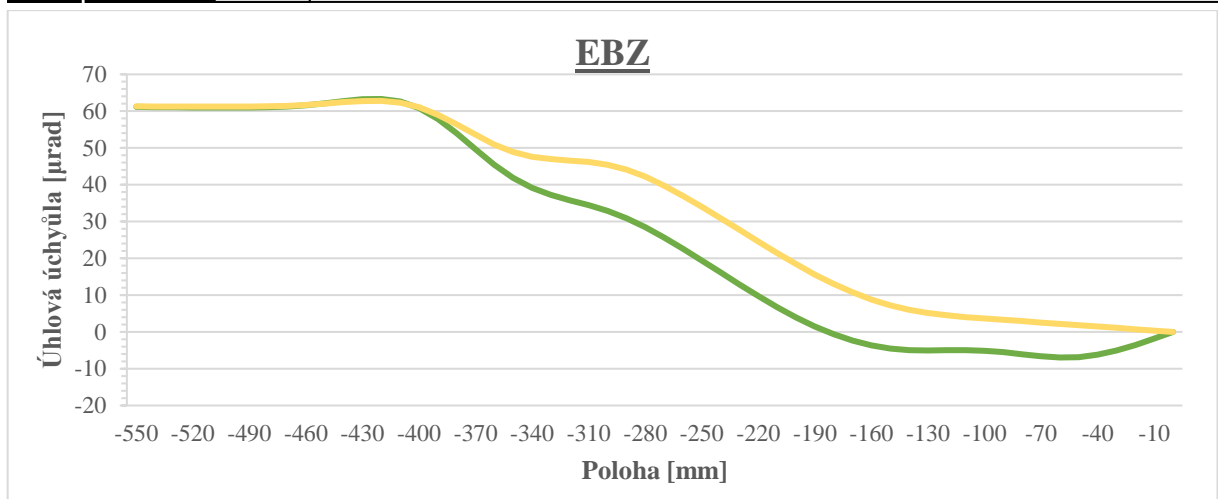
Obr. 64) Graf znázorňující průběhy chyby EY pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření



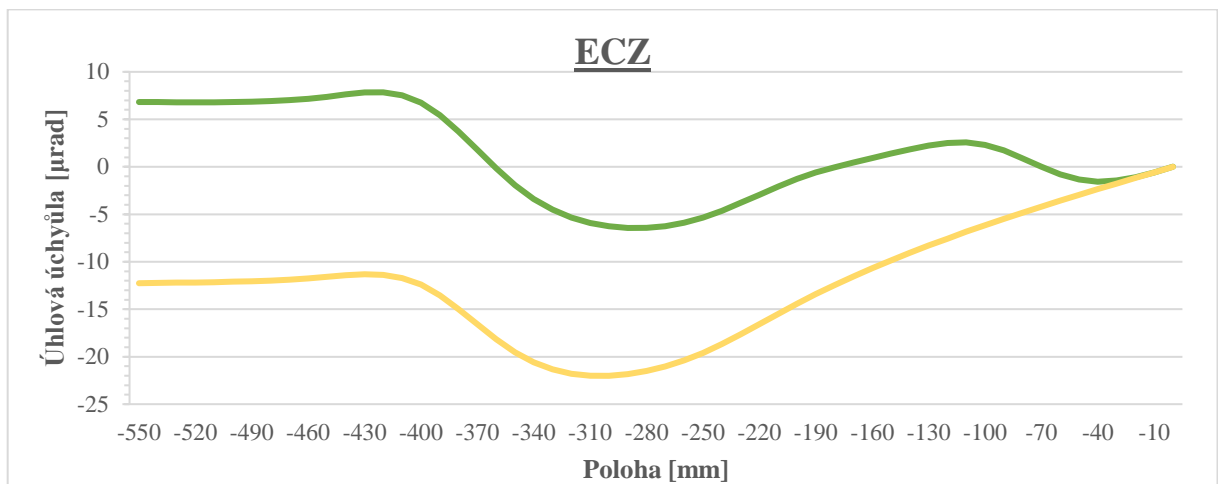
Obr. 65) Graf znázorňující průběhy chyby ECY pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření



Obr. 66) Graf znázorňující průběhy chyby EAZ pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření



Obr. 67) Graf znázorňující průběhy chyby EBZ pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření



Obr. 68) Graf znázorňující průběhy chyby ECZ pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření

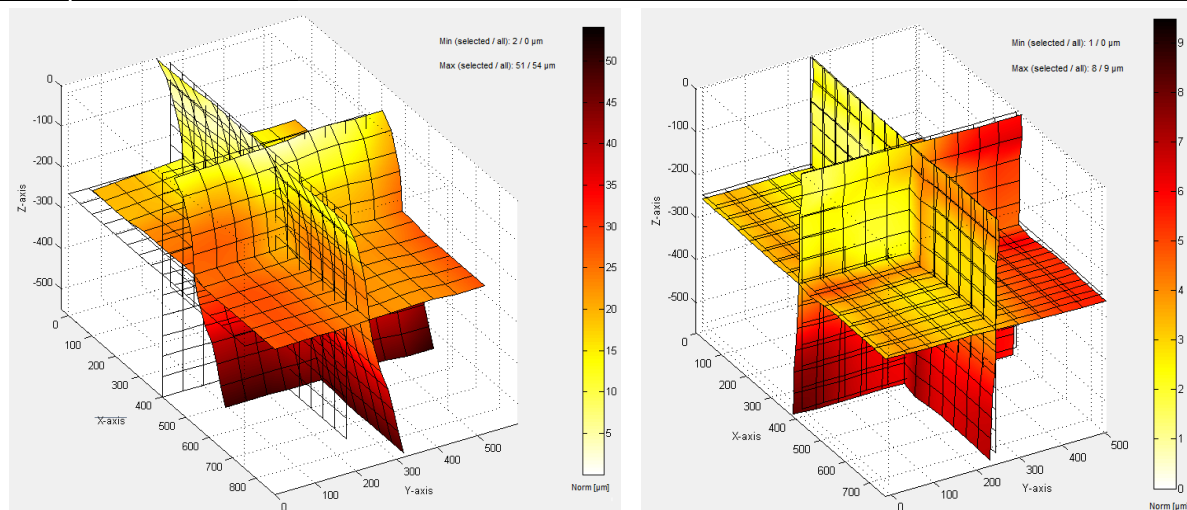
Tab 32) Výsledky rozsahů úchylek před a po kompenzacích

Parametr	Odchylka kalibrace	Odchylka verifikace	Rozdíl	
			Absolutní	Procentuální [%]
EXX	16,1	1,9	14,2	88,2
EYX	6,4	2,1	4,3	67,2
EZX	1,1	1,2	-0,1	-9,1
EXY	2,7	1,8	0,9	33,3
EYY	17,9	3,7	14,2	79,3
EZY	1,4	1,4	0	0
EXZ	8,4	1,5	6,9	82,1
EYZ	3,4	1,4	2	58,8
EZZ	6,3	5,8	0,5	7,9
EAX	8	3,1	4,9	61,3
EBX	21,2	7	14,2	67,0
ECX	20,2	3,5	16,7	82,7
EAY	14,6	4,6	10	68,5
EBY	21	3,1	17,9	85,2
ECY	32,2	24	8,2	25,5
EAZ	6,8	11,5	-4,7	-69,1
EBZ	70,4	63,2	7,2	10,2
ECZ	13,5	22,6	-9,1	-67,4
C0Y	40,2	-7,4	47,6	118,4
B0Z	-71,3	4,7	76	106,6
A0Z	48,9	-4,9	53,8	110,0



Obr. 69) Grafické znázornění odchylek kalibrace a verifikace

Je patrné (Tab 32 a Obr. 69), že kalibrace byla úspěšná a většina parametrů byla zlepšena. Ke zhoršení došlo pouze u dvou rotačních parametrů. U parametru EZX došlo také ke zvětšení rozsahu, avšak absolutní hodnota je menší, než je nejistota.



Obr. 70) Vektorová mapa před a po kompenzací

Z vektorových map (Obr. 70) můžeme vyčíst, že maximální úchylka v námi zvoleném prostoru byla před kompenzací 54 μm a minimální 0 μm . V_{xyz} bylo tedy 54 μm . Po námi vytvořených kompenzacích je maximální odchylka 9 μm a minimální 0 μm . V_{xyz} je rovno 9 μm .

8.3.2 Ballbar

Tab 33) Porovnání hodnot diagnostiky Ballbaru pro rovinu XY

	Bez kompenzace	S kompenzací	Rozdíl	
			Absolutní	Procentuální [%]
Kruhovitost	9,1 μm	6,4 μm	2,7 μm	29,7
Kolmost	20,2 $\mu\text{m/m}$	5 $\mu\text{m/m}$	15,2 $\mu\text{m/m}$	75,2
Přímocíarost X	-3,6 μm	0,6 μm	3 μm	83,3
Přímocíarost Y	-1,1 μm	-0,2 μm	0,9 μm	81,8
Chyba odměřování X	35,2 $\mu\text{m/m}$	9,5 $\mu\text{m/m}$	25,7 $\mu\text{m/m}$	73,0
Chyba odměřování Y	-0,6 $\mu\text{m/m}$	8,9 $\mu\text{m/m}$	-8,3 $\mu\text{m/m}$	-1383,3
Tolerance polohy	25,9 μm	9 μm	16,9 μm	65,3

Tab 34) Porovnání hodnot diagnostiky Ballbaru pro rovinu YZ

	Bez kompenzace	S kompenzací	Rozdíl	
			Absolutní	Procentuální [%]
Kruhovitost	11,9 μm	5,8 μm	6,1 μm	51,3
Kolmost	57,2 μm/m	-0,5 μm/m	56,7 μm/m	99,1
Přímočarost Y	1,2 μm	-1,4 μm	-0,2 μm	-16,7
Přímočarost Z	0,2 μm	1,1 μm	-0,9 μm	-450,0
Chyba odměřování Y	8,4 μm/m	11 μm/m	-2,6 μm/m	-31,0
Chyba odměřování Z	34,2 μm/m	19,2 μm/m	15 μm/m	43,9
Tolerance polohy	27,5 μm	11 μm	16,5 μm	60,0

Tab 35) Porovnání hodnot diagnostiky Ballbaru pro rovinu ZX

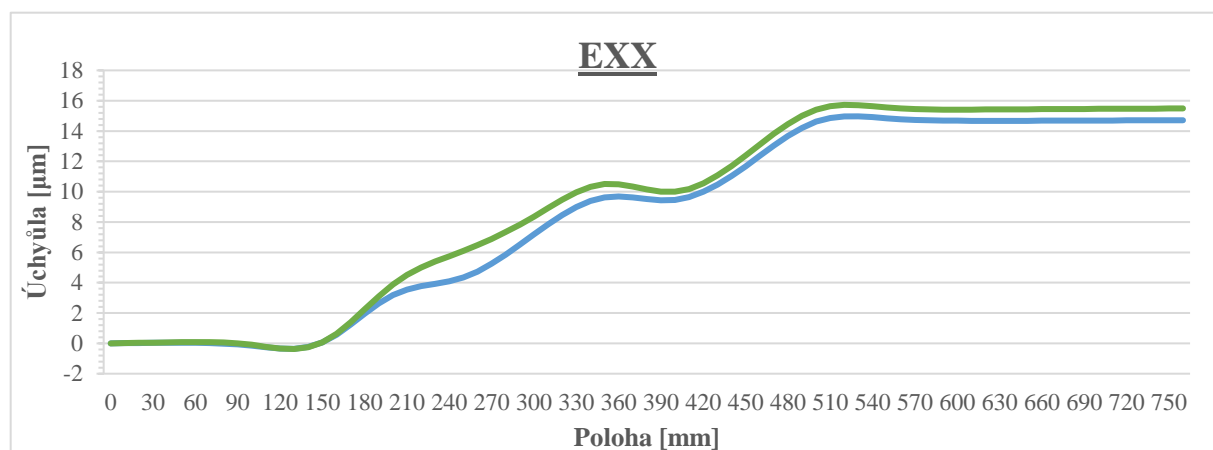
	Bez kompenzace	S kompenzací	Rozdíl	
			Absolutní	Procentuální [%]
Kruhovitost	11 μm	6,3 μm	4,7 μm	42,7
Kolmost	56 μm/m	10,7 μm/m	45,3 μm/m	80,9
Přímočarost Z	12,5 μm	0,9 μm	11,6 μm	92,8
Přímočarost X	0,3 μm	-2,3 μm	-2 μm	-666,7
Chyba odměřování Z	43,6 μm/m	22,6 μm/m	21 μm/m	48,2
Chyba odměřování X	38,5 μm/m	8,2 μm/m	30,3 μm/m	78,7
Tolerance polohy	50,9 μm	12,5 μm	38,4 μm	75,4

Podle diagnostiky Ballbaru (Tab 33–35) došlo po kompenzacích ke zhoršení odměřování Y v rovině XY a YZ. To si můžeme vysvětlit, stejným způsobem jako při metodě trigger. Ostatní zhoršené parametry jsou na hranici nejistoty měření s Ballbarem.

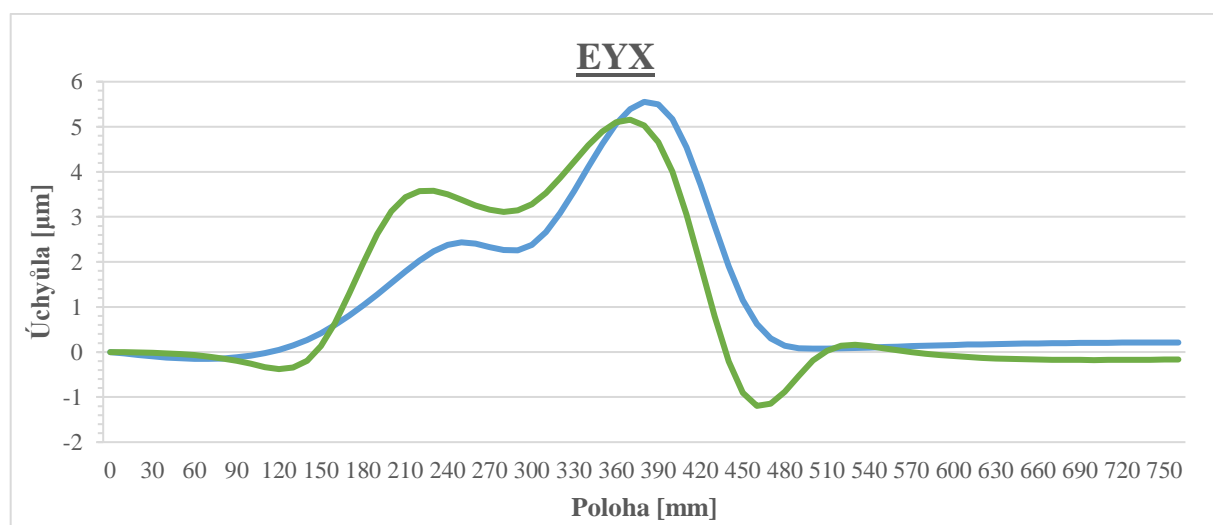
9 POROVNÁNÍ ON-THE-FLY A TRIGGER

Tato kapitola je klíčová, protože v ní porovnáme měření z kapitol 6 a 7 vůči sobě. V průběžích chyb (Obr 71–88) budeme porovnávat pouze verifikační měření, neboť právě to má přímý vliv i na kalibrační a jsou zhotovena na stroji se stejnou podmínkou, tedy bez aktivace jakýchkoli kompenzací. Očekáváme alespoň řádově podobné průběhy většiny chyb. Kvalitu kalibrace porovnáme pouze tabulkově z verifikačních hodnot. Porovnání kvality kalibrací z verifikačních dat získaných z LTc sice není úplně správným postupem, jelikož kontrolujeme stejným zařízením, jakým jsme kalibrovali, avšak i tato data mohou obsahovat zajímavé informace. Pro absolutní porovnání využijeme hodnoty z druhého zařízení, tedy Ballbaru. Dále nás budou zajímat nejistoty, residua a časy obou měření.

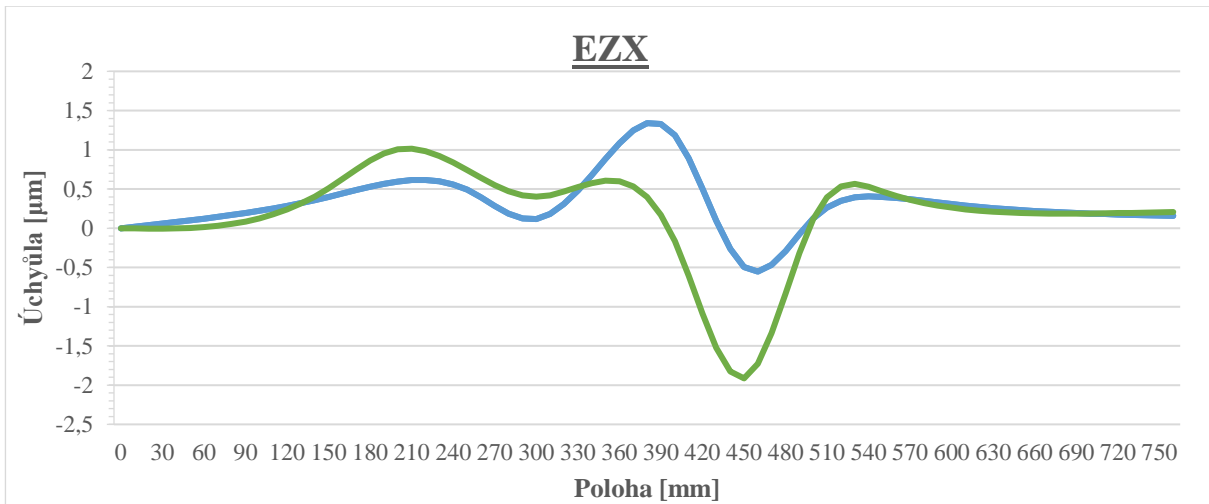
9.1 Porovnání průběhů a hodnot kalibrací



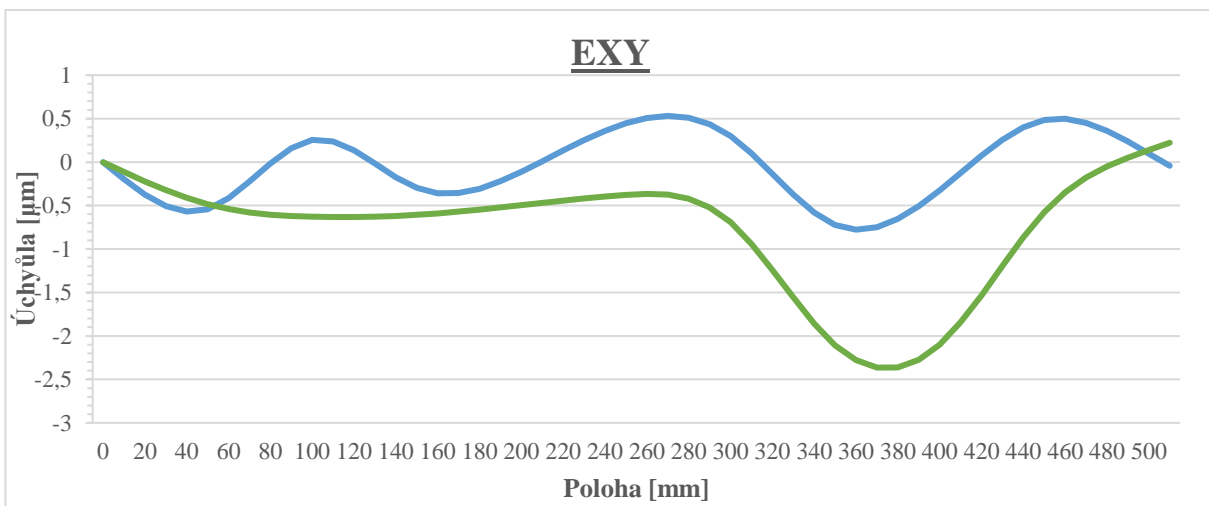
Obr. 71) Graf znázorňující průběhy chyby EXX pro verifikační měření trigger (modrá) a on-the-fly (zelená)



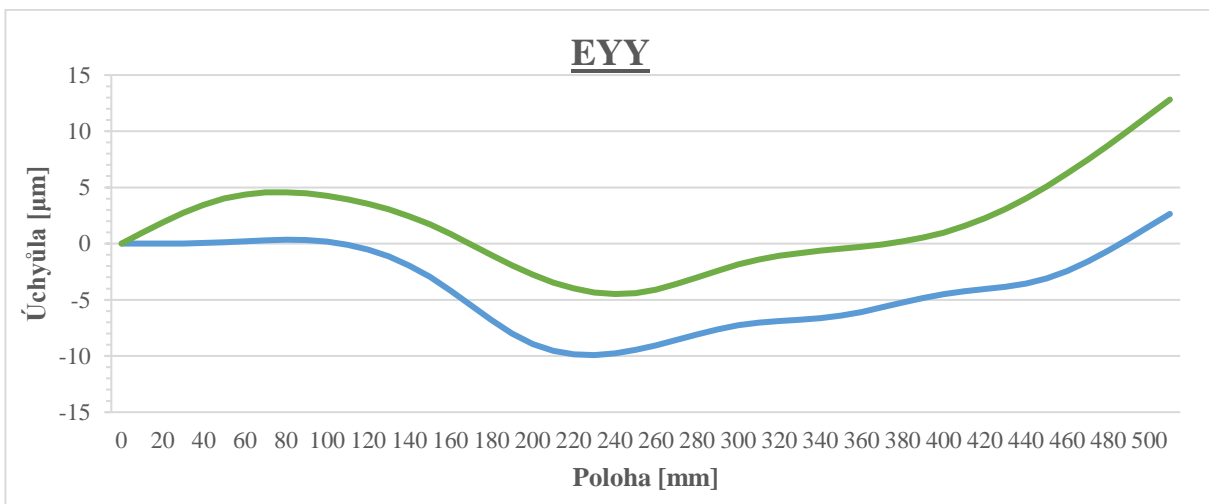
Obr. 72) Graf znázorňující průběhy chyby EYX pro verifikační měření trigger (modrá) a on-the-fly (zelená)



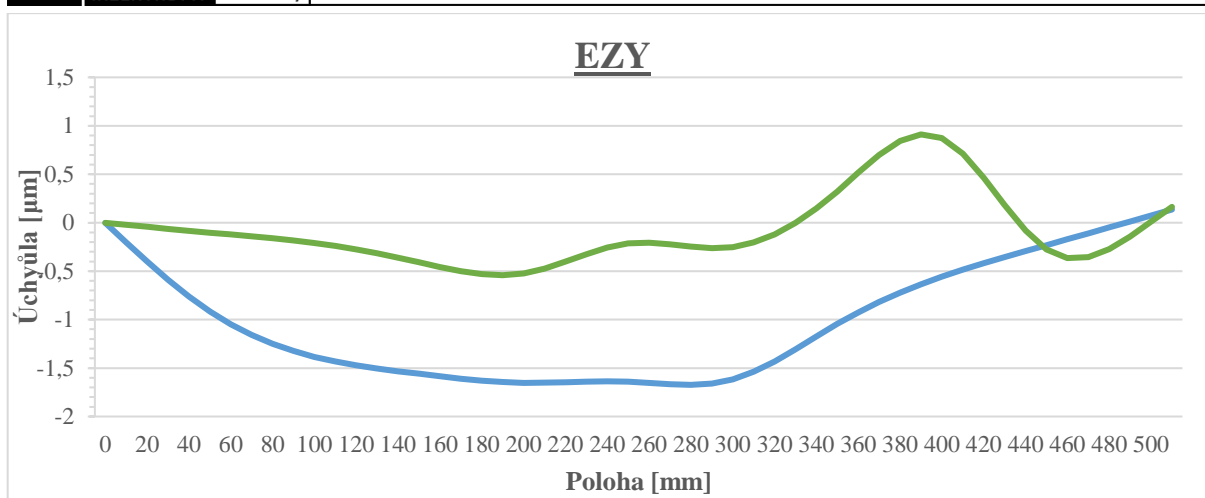
Obr. 73) Graf znázorňující průběhy chyby EZX pro verifikační měření trigger (modrá) a on-the-fly (zelená)



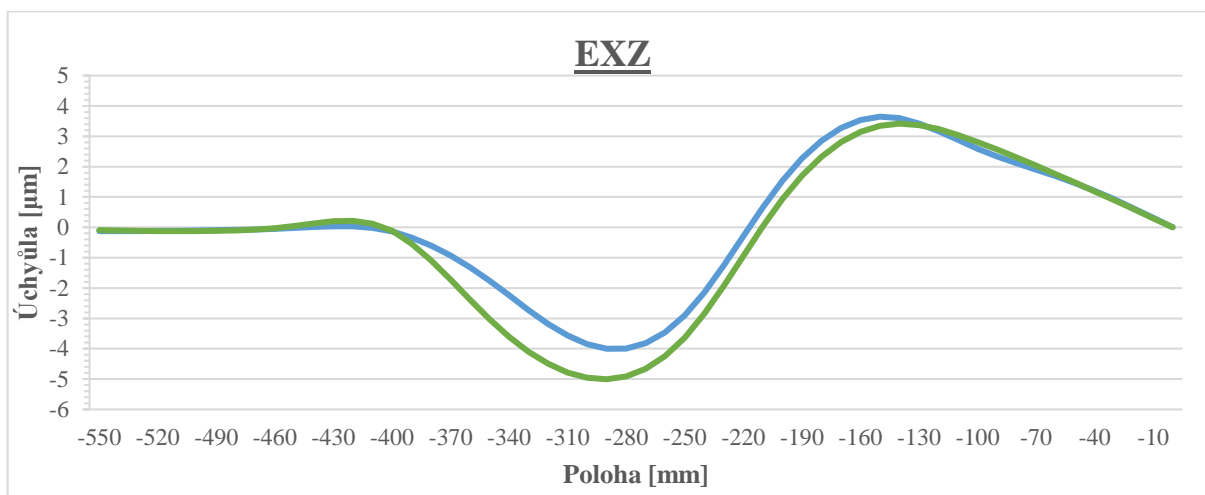
Obr. 74) Graf znázorňující průběhy chyby EXY pro verifikační měření trigger (modrá) a on-the-fly (zelená)



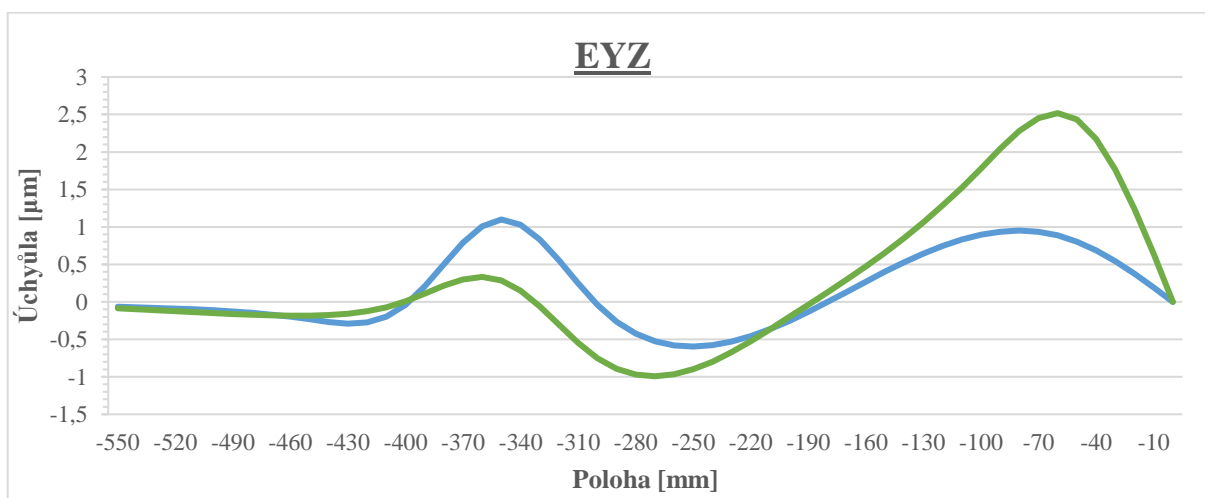
Obr. 75) Graf znázorňující průběhy chyby EYY pro verifikační měření trigger (modrá) a on-the-fly (zelená)



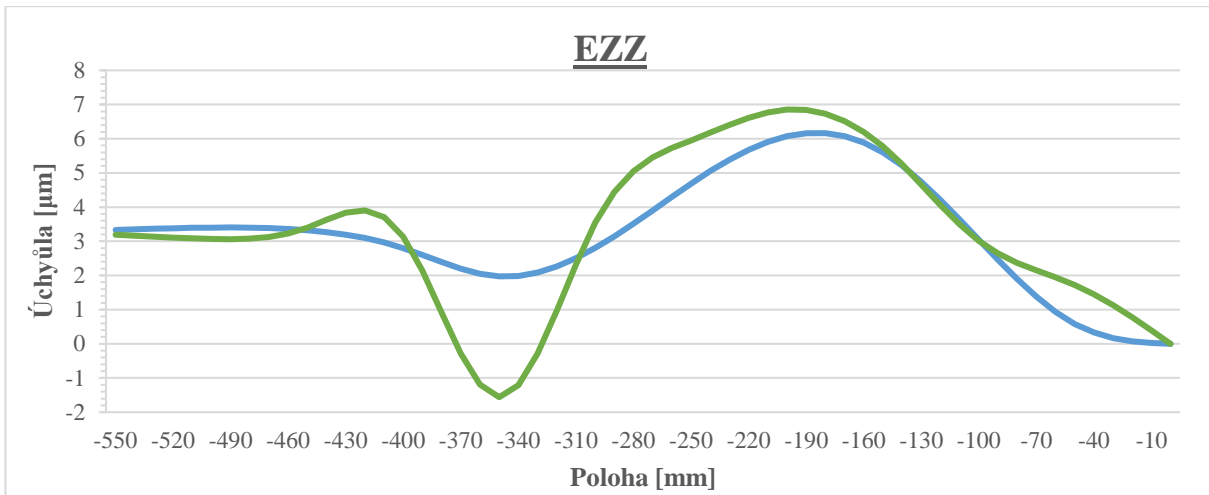
Obr. 76) Graf znázorňující průběhy chyby EZY pro verifikační měření trigger (modrá) a on-the-fly (zelená)



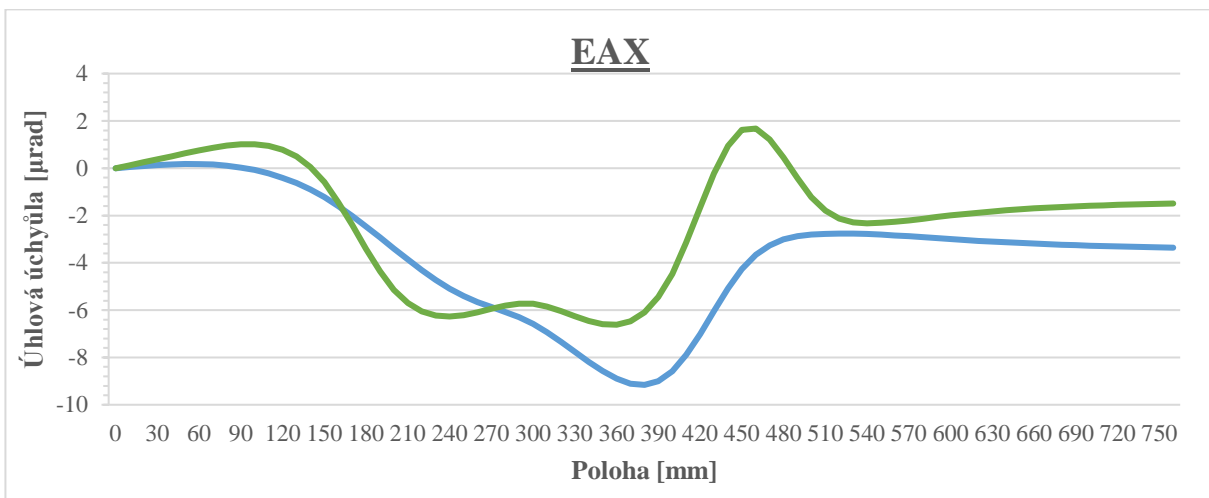
Obr. 77) Graf znázorňující průběhy chyby EXZ pro verifikační měření trigger (modrá) a on-the-fly (zelená)



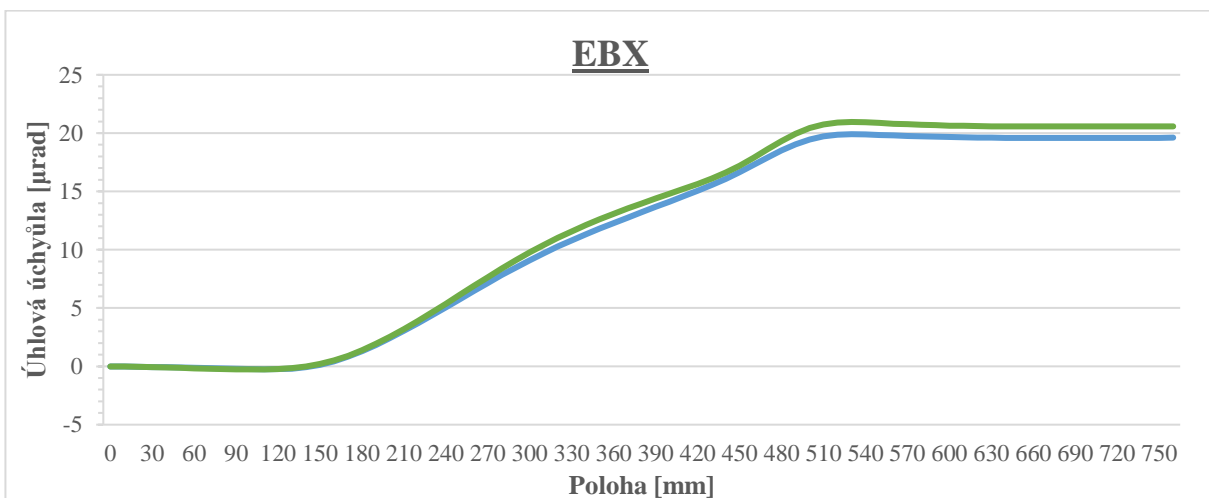
Obr. 78) Graf znázorňující průběhy chyby EYZ pro verifikační měření trigger (modrá) a on-the-fly (zelená)



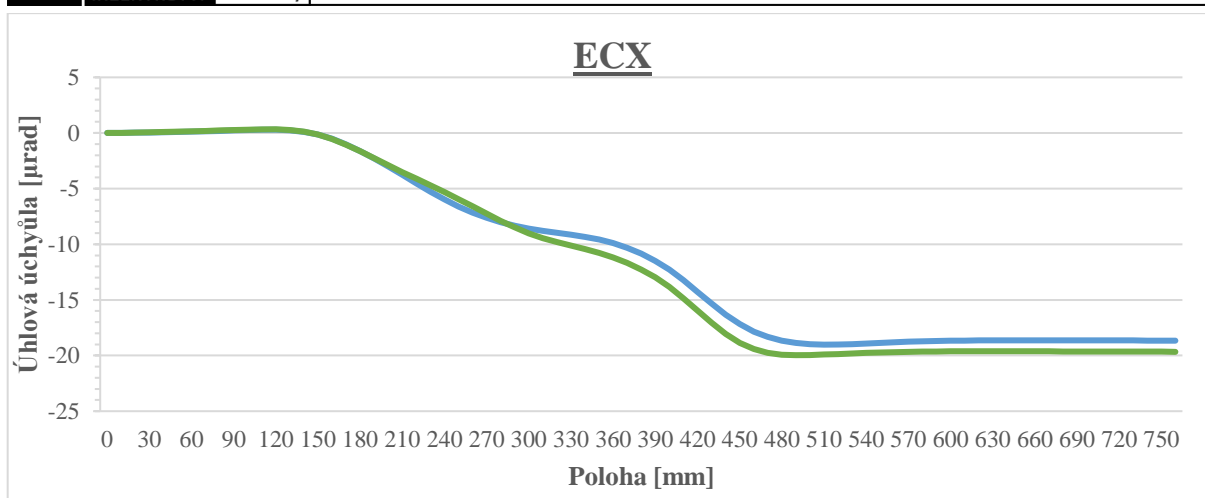
Obr. 79) Graf znázorňující průběhy chyby EZZ pro verifikační měření trigger (modrá) a on-the-fly (zelená)



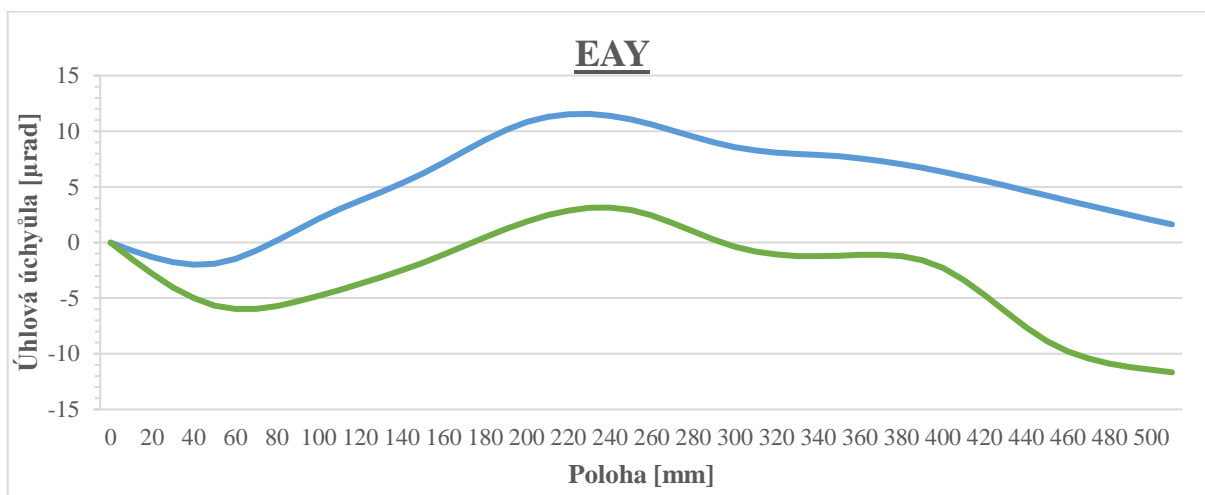
Obr. 80) Graf znázorňující průběhy chyby EAX pro verifikační měření trigger (modrá) a on-the-fly (zelená)



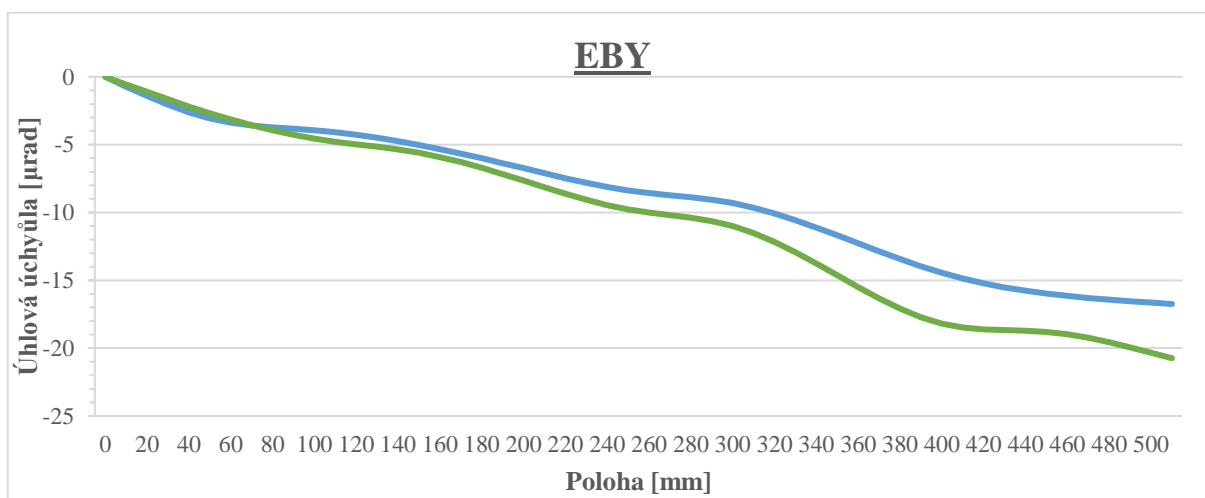
Obr. 81) Graf znázorňující průběhy chyby EBX pro verifikační měření trigger (modrá) a on-the-fly (zelená)



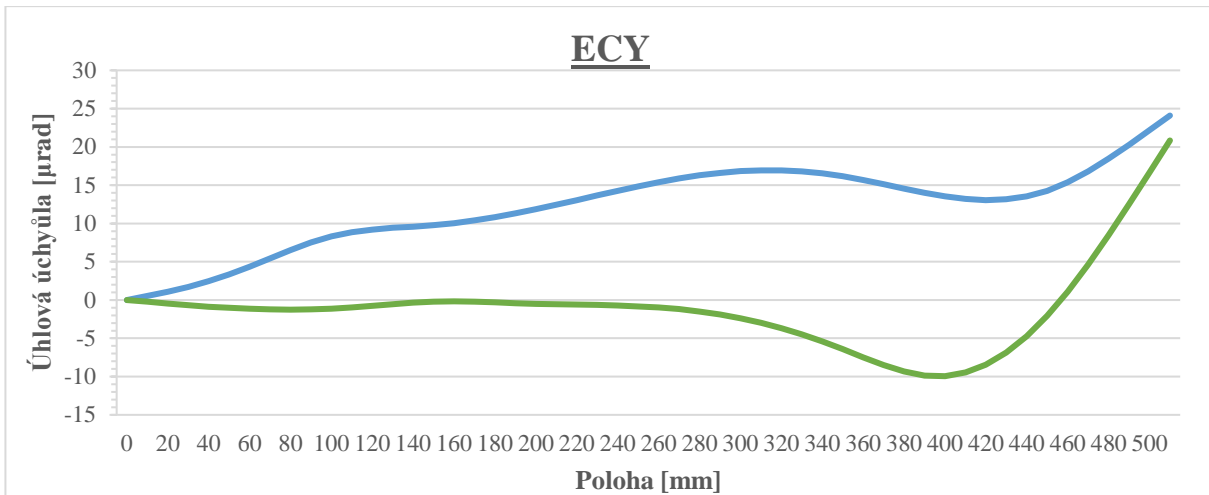
Obr. 82) Graf znázorňující průběhy chyby ECX pro verifikační měření trigger (modrá) a on-the-fly (zelená)



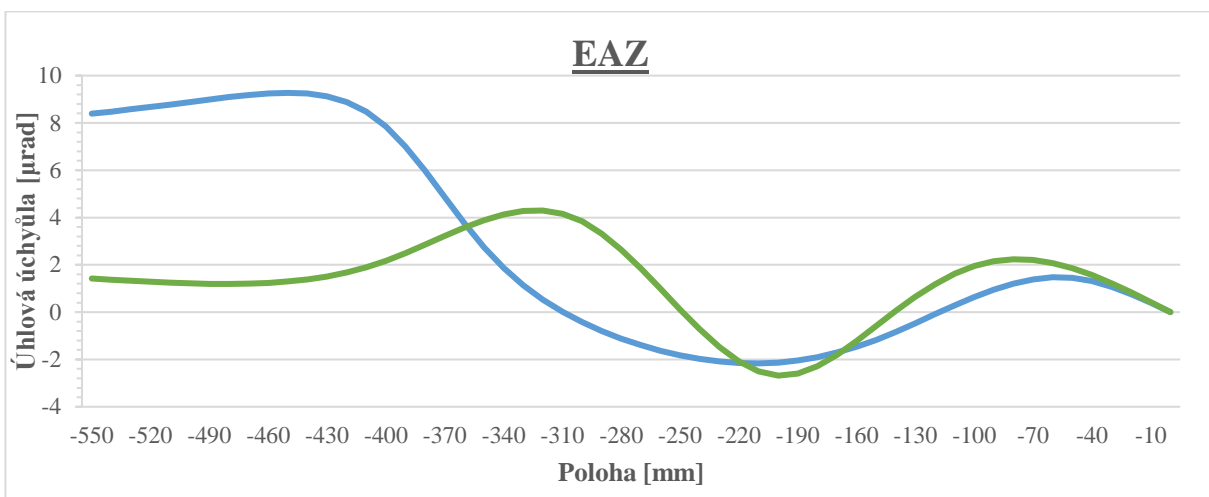
Obr. 83) Graf znázorňující průběhy chyby EAY pro verifikační měření trigger (modrá) a on-the-fly (zelená)



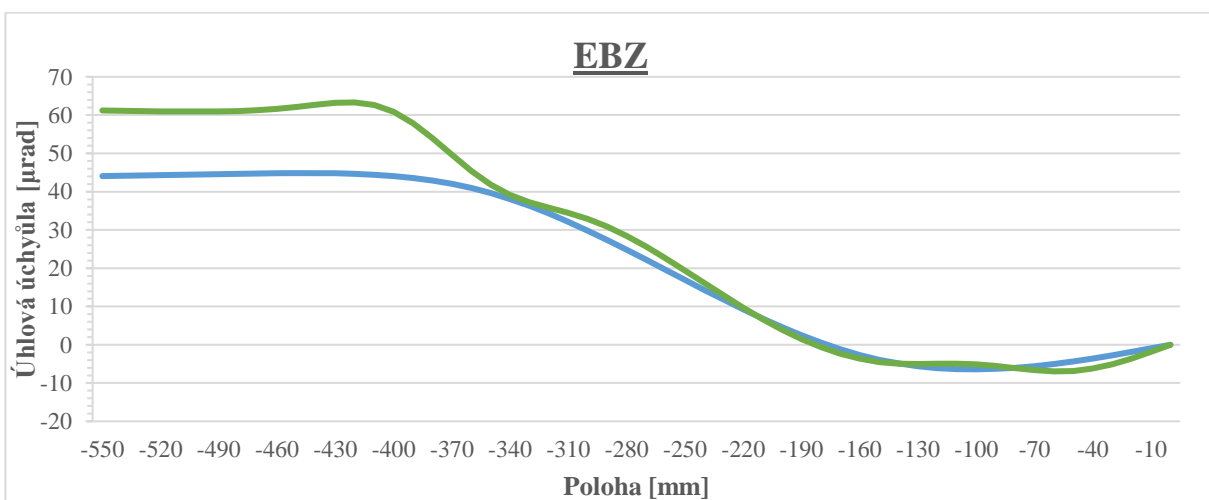
Obr. 84) Graf znázorňující průběhy chyby EBY pro verifikační měření trigger (modrá) a on-the-fly (zelená)



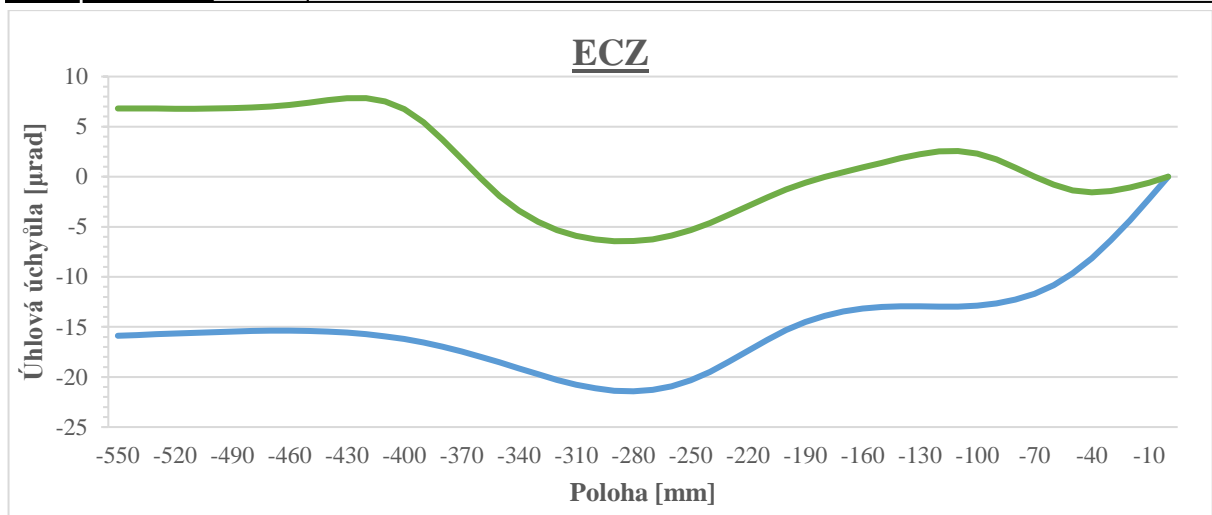
Obr. 85) Graf znázorňující průběhy chyby ECY pro verifikační měření Trigger (modrá) a On the fly (zelená)



Obr. 86) Graf znázorňující průběhy chyby EAZ pro verifikační měření trigger (modrá) a on-the-fly (zelená)



Obr. 87) Graf znázorňující průběhy chyby EBZ pro verifikační měření trigger (modrá) a on-the-fly (zelená)



Obr. 88) Graf znázorňující průběhy chyby ECZ pro verifikační měření trigger (modrá) a on-the-fly (zelená)

Průběhy chyb potvrdil náš předpoklad vzájemné podobnosti. U některých z nich můžeme sledovat jiný nebo posunutý průběh. Důvodem může být i to, že jednotlivá měření probíhala v jiných teplotních podmínkách. Tyto změny můžeme pozorovat zejména na chybách EXY, EZZ, EZY, ECY, EAZ a ECZ. V dalších částech se na tyto chyby zaměříme a posoudíme, zdali se blíží realitě hodnoty naměřené pomocí metody triggeru nebo on-the-fly.

Tab 36) Tabulka hodnot rozptylů úchylek pro obě kalibrační měření

Parametr	Odchylka kalibrace Trigger	Odchylka kalibrace On-the-fly	Rozdíl absolutní	Průměrná nejistota (95%)
EXX	15,3 μm	16,1 μm	0,8 μm	0,2 μm
EYX	5,6 μm	6,4 μm	0,8 μm	0,5 μm
EZX	1,8 μm	1,1 μm	0,7 μm	0,3 μm
EXY	1,3 μm	2,7 μm	1,4 μm	0,2 μm
EYY	12,7 μm	17,9 μm	5,2 μm	0,5 μm
EZY	1,8 μm	1,4 μm	0,4 μm	0,2 μm
EXZ	7,6 μm	8,4 μm	0,8 μm	0,1 μm
EYZ	1,7 μm	3,4 μm	1,7 μm	0,1 μm
EZZ	6,3 μm	6,3 μm	0 μm	0,3 μm
EAX	9,2 μrad	8 μrad	1,2 μrad	1,3 μrad
EBX	20,2 μrad	21,2 μrad	1 μrad	0,5 μrad
ECX	19,4 μrad	20,2 μrad	0,8 μrad	0,3 μrad
EAY	13,6 μrad	14,6 μrad	1 μrad	1,1 μrad
EBY	16,7 μrad	21 μrad	4,3 μrad	0,3 μrad
ECY	24,7 μrad	32,2 μrad	7,5 μrad	1,4 μrad
EAZ	11,5 μrad	6,8 μrad	4,7 μrad	1,2 μrad
EBZ	51,4 μrad	70,4 μrad	19 μrad	1,1 μrad
ECZ	23,7 μrad	13,5 μrad	10,2 μrad	0,7 μrad
C0Y	37,6 μrad	40,2 μrad	2,6 μrad	0,7 μrad
B0Z	-64,5 μrad	-71,3 μrad	6,8 μrad	0,6 μrad
A0Z	38,9 μrad	48,9 μrad	10 μrad	0,3 μrad

Z tabulky (Tab 36) porovnávající kalibraci obou měření je patrné, že k největšímu rozdílu došlo u chyby EYY a u většiny chyb rotačních (EBY, ECY, EAZ, EBZ) a chyb kolmostí (B0Z, A0Z). U parametrů EZZ, EZY, EXY a EYX, u nichž jsme si všimli rozdílného průběhu však disponují hodnotu podobnou. Tedy přesto, že jejich průběhy nejsou podobné, rozdíl maximální a minimální úchylky je srovnatelný. Dále si musíme uvědomit, že se nejedná o přesné hodnoty, ale jsou zatíženy nejistotou. Tedy je možnost že rozdíly mezi kalibracemi jsou menší o dvojnásobek nejistoty. Naše dvě měření byla také provedeny s měsíčním odstupem, i to může být důsledkem těchto rozdílů.

9.2 Porovnání hodnot verifikací

Tab 37) Porovnání verifikačních hodnot

Parametr	Odchylka verifikace Trigger	Odchylka verifikace On-the-fly
EXX	2,5 μm	1,9 μm
EYX	2 μm	2,1 μm
EZX	2 μm	1,2 μm
EXY	2,4 μm	1,8 μm
EYY	13,1 μm	3,7 μm
EZY	6,1 μm	1,4 μm
EXZ	0,4 μm	1,5 μm
EYZ	0,5 μm	1,4 μm
EZZ	5,8 μm	5,8 μm
EAX	6,4 μrad	3,1 μrad
EBX	10,9 μrad	7 μrad
ECX	7,7 μrad	3,5 μrad
EAY	22,6 μrad	4,6 μrad
EBY	4,1 μrad	3,1 μrad
ECY	39,1 μrad	24 μrad
EAZ	17 μrad	11,5 μrad
EBZ	86,9 μrad	63,2 μrad
ECZ	24,9 μrad	22,6 μrad
C0Y	4,6 μrad	-7,4 μrad
B0Z	-8,1 μrad	4,7 μrad
A0Z	10,6 μrad	-4,9 μrad

Tabulka (Tab 37) rozptýlů úchylek verifikačních měření naznačuje, že kalibrace metodou on-the-fly byla úspěšnější. Z kapitol 7 a 8 je patrné, že jak podle výsledků LTC i Ballbaru došlo u metody on-the-fly k více zlepšením a méně zhoršením než u metody Trigger. Jak již bylo řečeno, toto porovnání není zcela korektní, proto následující tabulka bude porovnávat výsledky verifikací z diagnostiky Ballbaru.

Tab 38) Porovnání hodnot verifikace diagnostiky Ballbaru pro rovinu XY

	S kompenzací Trigger	S kompenzací On-the-fly	Absolutní rozdíl
Kruhovitost	6,4 μm	6,4 μm	0 μm
Kolmost	5 $\mu\text{m/m}$	5 $\mu\text{m/m}$	0 $\mu\text{m/m}$
Přímočarost X	1 μm	0,6 μm	0,4 μm
Přímočarost Y	0,1 μm	-0,2 μm	0,1 μm
Chyba odměřování X	6,1 $\mu\text{m/m}$	9,5 $\mu\text{m/m}$	3,4 μm
Chyba odměřování Y	11,6 $\mu\text{m/m}$	8,9 $\mu\text{m/m}$	2,7 $\mu\text{m/m}$
Tolerance polohy	9,8 μm	9 μm	0,8 μm

Tab 39) Porovnání hodnot verifikace diagnostiky Ballbaru pro rovinu YZ

	S kompenzací Trigger	S kompenzací On-the-fly	Absolutní rozdíl
Kruhovitost	5,5 μm	5,8 μm	0,3 μm
Kolmost	-2,6 $\mu\text{m/m}$	-0,5 $\mu\text{m/m}$	2,1 $\mu\text{m/m}$
Přímočarost Y	0,5 μm	-1,4 μm	0,9 μm
Přímočarost Z	1,6 μm	1,1 μm	0,4 μm
Chyba odměřování Y	16,6 $\mu\text{m/m}$	11 $\mu\text{m/m}$	5,6 $\mu\text{m/m}$
Chyba odměřování Z	26,2 $\mu\text{m/m}$	19,2 $\mu\text{m/m}$	7 $\mu\text{m/m}$
Tolerance polohy	15,2 μm	11 μm	4,2 μm

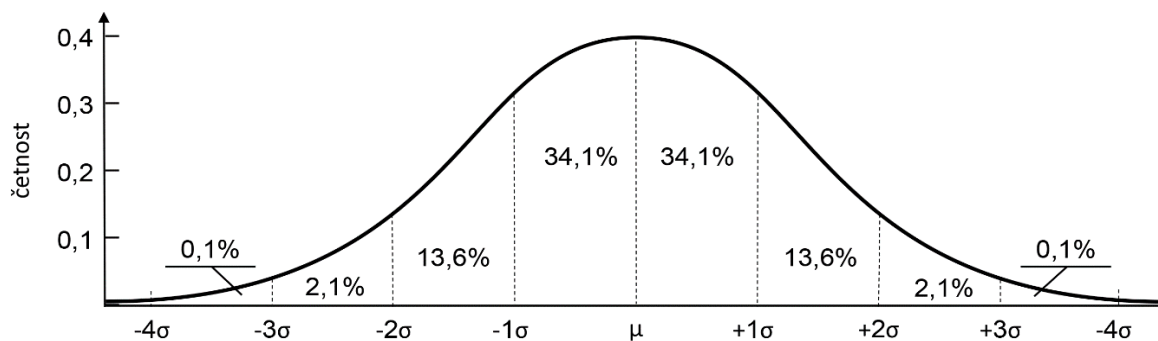
Tab 40) Porovnání hodnot verifikace diagnostiky Ballbaru pro rovinu ZX

	S kompenzací Trigger	S kompenzací On-the-fly	Absolutní rozdíl
Kruhovitost	5,1 μm	6,3 μm	1,2 μm
Kolmost	7,4 $\mu\text{m/m}$	10,7 $\mu\text{m/m}$	3,3 $\mu\text{m/m}$
Přímočarost Z	0,4 μm	0,9 μm	0,5 μm
Přímočarost X	0,5 μm	-2,3 μm	1,8 μm
Chyba odměřování Z	23,9 $\mu\text{m/m}$	22,6 $\mu\text{m/m}$	1,3 $\mu\text{m/m}$
Chyba odměřování X	10,4 $\mu\text{m/m}$	8,2 $\mu\text{m/m}$	2,2 $\mu\text{m/m}$
Tolerance polohy	12,1 μm	12,5 μm	0,4 μm

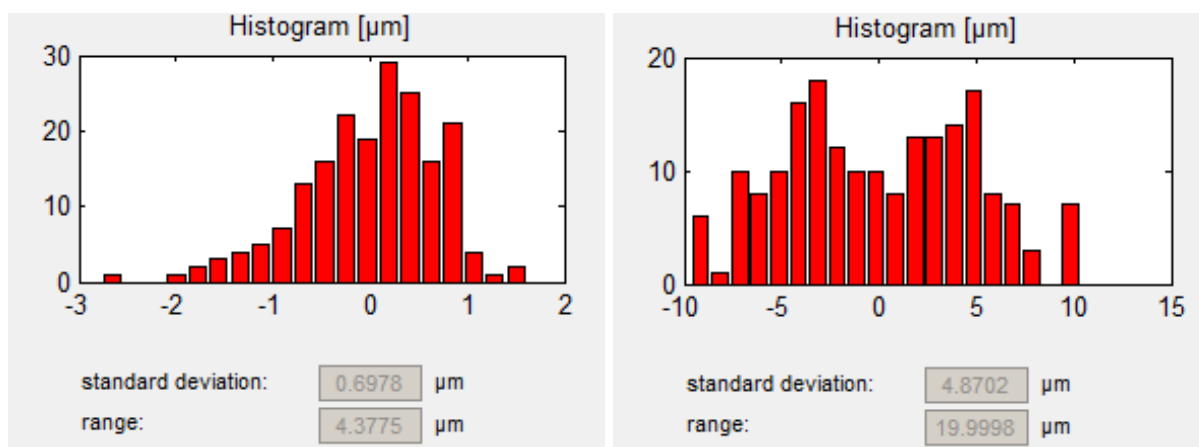
Výsledky z Ballbaru (Tab 38–40) jsou pro obě metody velmi podobné a neobsahují žádné extrémní hodnoty. Rozdíly jsou často na hranici nejistoty. Parametry, jejichž rozdíl je vyšší než 4 μm nebo 4 $\mu\text{m/m}$ mají vždy lepší hodnotu při kompenzaci metodou on-the-fly.

9.3 Porovnání histogramů residuí

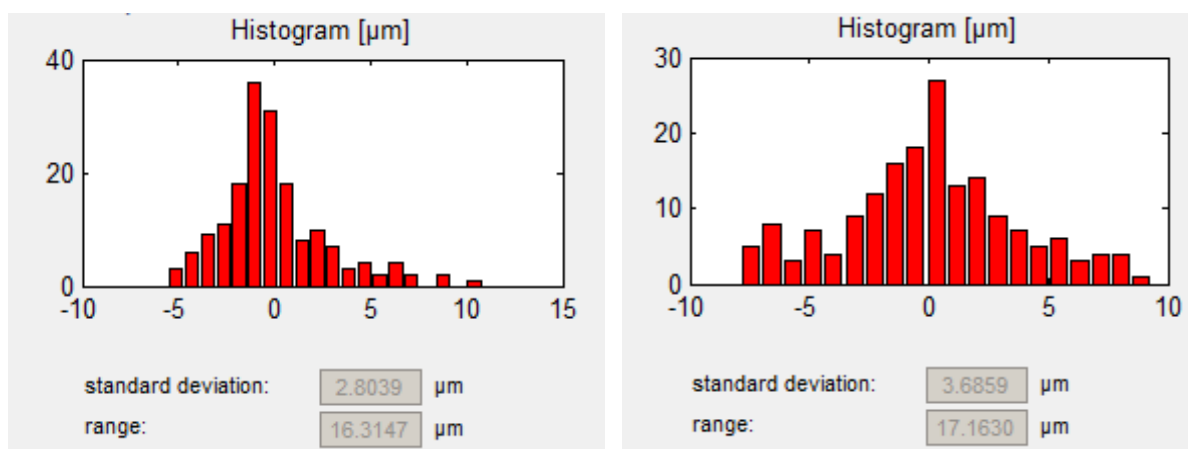
Nejdříve porovnáme histogramy residuí pro jednotlivé pozice (Obr 90. –96). Nalevo je vždy histogram pro metodu trigger a napravo pro metodu on-the-fly. Tyto histogramy by ideálně měly kopírovat tvar Gaussovy křivky (Obr. 89), z čehož plyne, že tyto hodnoty by měly odpovídat normálnímu rozdělení.



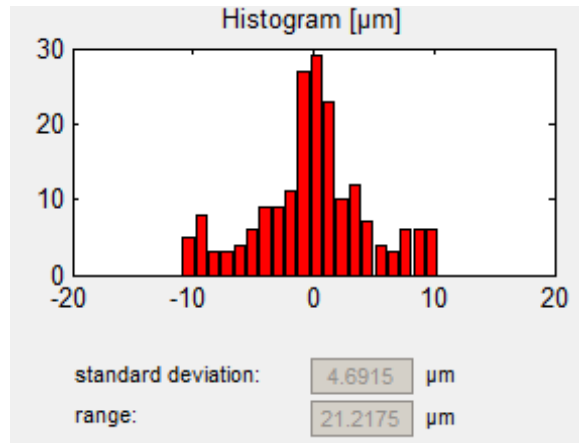
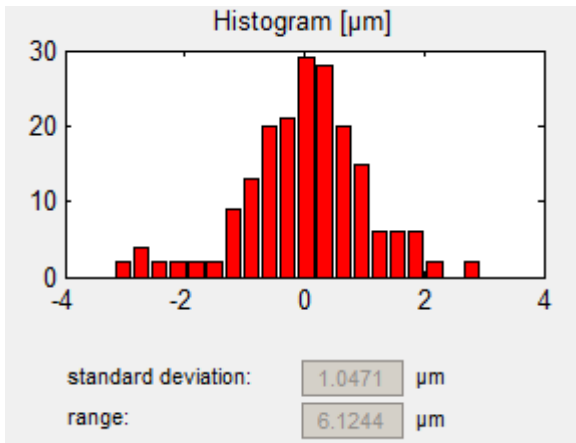
Obr. 89) Gaussova křivka



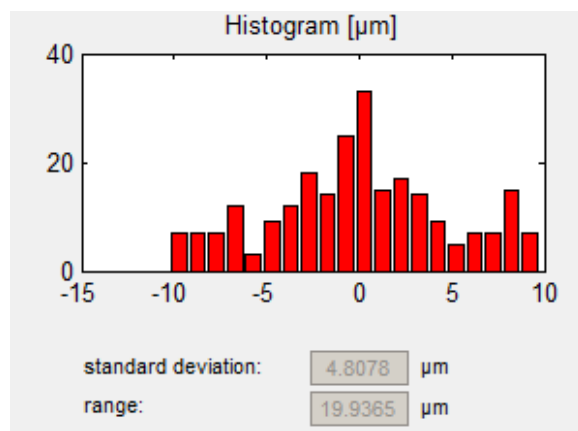
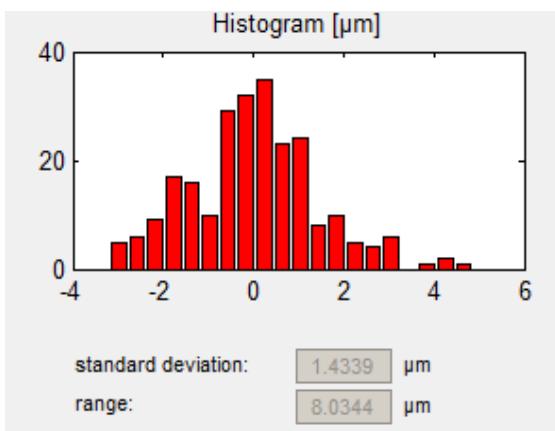
Obr. 90) Histogramy residuí pro pozici 1



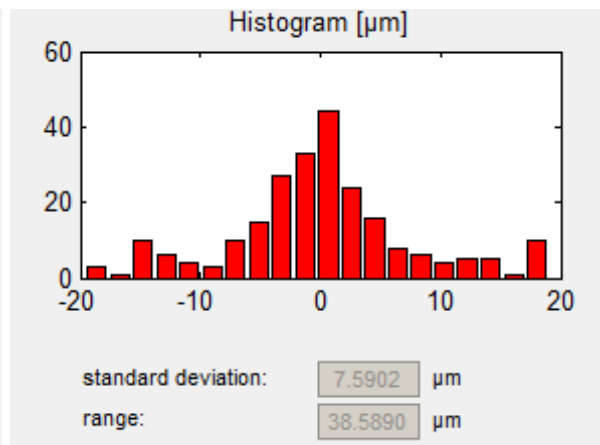
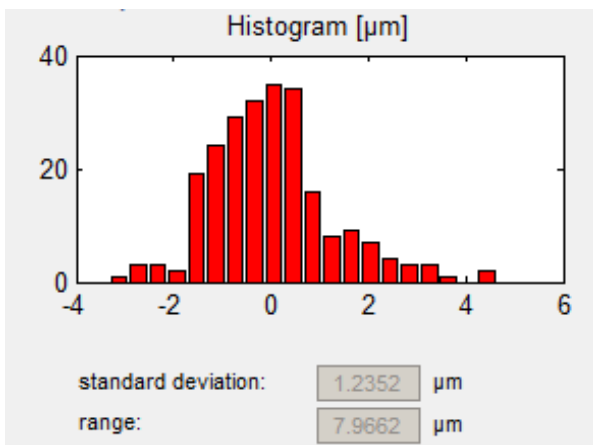
Obr. 91) Histogramy residuí pro pozici 2



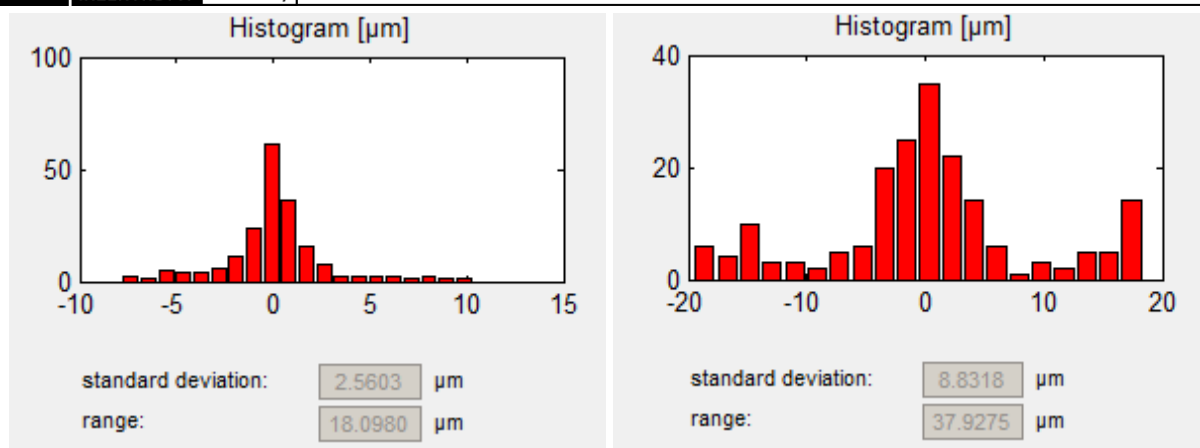
Obr. 92) Histogramy residuí pro pozici 3



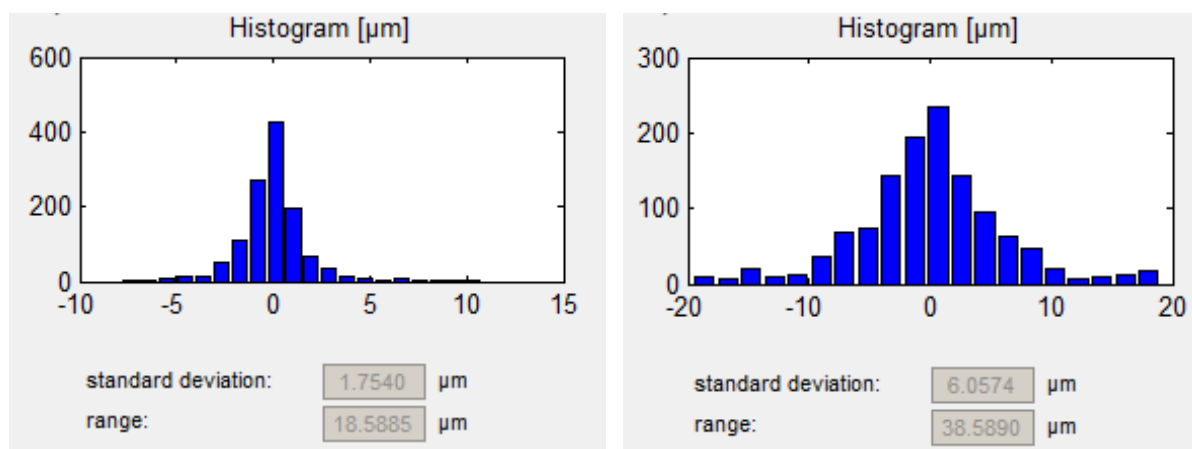
Obr. 93) Histogramy residuí pro pozici 4



Obr. 94) Histogramy residuí pro pozici 5



Obr. 95) Histogramy residuí pro pozici 6



Obr. 96) Histogramy residuí pro všechny pozice

Na základě histogramů můžeme říci, že přibližnému tvaru Gaussovy křivky odpovídají všechny pozice kromě první měřené metodou on-the-fly. Jelikož se však jedná o výjimku odhadujeme, že při měření této pozice došlo k chybě upnutí nebo k velkým vibracím laserové hlavy.

Rozsahy úchylek při měření metodou on-the-fly jsou zhruba dvojnásobné než u triggeru. Tento jev přisuzujeme nemožnosti eliminace chvění vzniklého dynamikou pohybu, zejména rozjezdu a brždění. Doporučujeme proto, histogramy residuí při budoucích měření sledovat, přesto ale zvětšení rozsahu úchyly považujeme za jev, který je vlastní metodě on-the-fly.

9.4 Porovnání nejistot

Následující tabulka (Tab 41) porovnává nejistoty chybových parametrů ze všech čtyř měření.

Tab 41) Porovnání nejistot měření

	Nejistoty trigger		Nejistoty on-the-fly	
EXX	0,2 μm	0,3 μm	0,2 μm	0,2 μm
EYX	0,5 μm	0,7 μm	0,5 μm	0,6 μm
EZX	0,3 μm	0,3 μm	0,3 μm	0,3 μm
EXY	0,1 μm	0,1 μm	0,2 μm	0,2 μm
EYY	0,5 μm	0,5 μm	0,5 μm	0,5 μm
EZY	0,2 μm	0,3 μm	0,3 μm	0,2 μm
EXZ	0,1 μm	0,1 μm	0,1 μm	0,1 μm
EYZ	0,1 μm	0,1 μm	0,1 μm	0,1 μm
EZZ	0,3 μm	0,3 μm	0,3 μm	0,3 μm
EAX	1,2 μrad	1,7 μrad	1,3 μrad	1,3 μrad
EBX	0,4 μrad	0,5 μrad	0,4 μrad	0,5 μrad
ECX	0,3 μrad	0,4 μrad	0,3 μrad	0,3 μrad
EAY	1,1 μrad	1,1 μrad	1,3 μrad	1,1 μrad
EBY	0,3 μrad	0,3 μrad	0,3 μrad	0,3 μrad
ECY	1,2 μrad	1,4 μrad	1,4 μrad	1,4 μrad
EAZ	1,2 μrad	1,2 μrad	1,1 μrad	1,2 μrad
EBZ	1,3 μrad	1 μrad	1,1 μrad	1,1 μrad
ECZ	0,8 μrad	1 μrad	0,7 μrad	0,7 μrad
C0Y	0,7 μrad	0,8 μrad	0,8 μrad	0,7 μrad
B0Z	0,5 μrad	0,6 μrad	0,6 μrad	0,6 μrad
A0Z	0,4 μrad	0,4 μrad	0,4 μrad	0,3 μrad

Tabulka neobsahuje žádné extrémní hodnoty, rozdíly nepřesahují 0,2 μm a 0,4 μrad . Nejde také vidět žádný trend, který by naznačoval menších nejistot při jedné z metod. Hodnoty jsou pro obě metody až překvapivě podobné. Zde je možné, že vyhodnocovací software nebere v úvahu všechny změřené body metodou on-the-fly, ale pouze ty body, které vznikly pomocí trojúhelníkového váhování (viz kapitola 6.2.2). Rozdíl mezi metodou výpočtu nejistot při využití metody trigger a on-the-fly by mohl být předmětem dotazu určeného společnosti Etalon.

9.5 Porovnání časů

Tabulka (Tab 42) porovnává doby měření jednotlivými metodami

Tab 42) Tabulka časů měření

Trigger	On-the-fly	On-the-fly po teoretické optimalizaci
0:58:15	1:03:00	~ 0:33:00
0:58:03	1:18:00	~ 0:33:00

Doby měření metodou on-the-fly jsou delší a proměnlivé, což bylo způsobeno neúplnou optimalizací metody. Tato optimalizace je popsána v kapitole 6.2.2. V případě této ideální optimalizace mohlo by dojít ke zkrácení času až o 43 % vzhledem k triggeru.

10 ZÁVĚR

Na přesnost obráběcích strojů jsou v dnešní době kladeny stále větší nároky. Tato přesnost může být zlepšena nejen při výrobě, ale i softwarovými kompenzacemi, mezi něž patří také volumetrické kompenzace, které mohou sloužit jak výrobcům strojů, tak jejich uživatelům. Výrobci mohou redukovat výrobní náklady na přesné obrábění a zaškrabávání, nebo mohou povýšit deklarované přesnosti parametry svých strojů. Uživatelé mohou zefektivnit svou produkci díky přesným dokončovacím operacím. Tedy tyto kompenzace mají nesporné využití, avšak požadavky průmyslu směřují na efektivnost a rychlost kalibrace. Proto jsme v této práci otestovali metodu měření samonaváděcím interferometrem zvanou on-the-fly. Cílem bylo zjistit, jak je tato metoda efektivní a časově náročná v porovnání s tradičně používanou metodou trigger.

V druhé a třetí kapitole jsme si vymezili pojmy důležité pro tuto práci. Jde o geometrickou a volumetrickou přesnost a vztahy mezi nimi.

Kapitola čtvrtá pojednává o zařízeních využívaných v oblasti kalibrace obráběcích strojů. Pro naši práci se jedná zejména o LaserTRACER (LTc) a Ballbar, u nichž jsme popsali jejich účel a vhodnost použití. Důležitou částí kapitoly představuje definice metod trigger a on-the-fly užívaných pro snímání bodů pomocí LTc

Klíčové je propojení systému LTc s řídicím systémem obráběcího stroje rozebrané v kapitole 5. Díky němu jsme schopni získávat data o poloze stroje, současně také o délce laserového paprsku a následně je vyhodnocovat.

Popis práce se softwarem Trac-cal, včetně budování strategie pro všechna měření LTc, a odlišností nastavení jednotlivých metod obsahuje kapitola 6.

V kapitolách 6 a 7 jsou souhrnně vypsány výsledky kalibračních i verifikačních měření obou metod a výsledky měření pomocí Ballbaru.

Závěry této práce jsou zřejmé zejména z osmé kapitoly, kde byly porovnávány jednotlivá měření z kapitol 6 a 7. Nejprve byly porovnávány průběhy a rozsahy jednotlivých chyb bez kompenzací. Většina chyb měla podobný průběh i rozsah při obou metodách a u některých, zejména uhlových chyb, byl průběh sice podobný, ale posunutý. To může být způsobené různými podmínkami při jednotlivých měřeních, mezi nimiž byl časový interval zhruba jeden měsíc. Interferometrické měření i mechanika stroje jsou velmi citlivé na vnější okolí. Ideálně by k měřením mělo dojít v laboratorních podmínkách a měla by se opakovat, avšak to nebylo z důvodů teplotních výkyvů haly a časových možností proveditelné a reálně ani takové podmínky průmysl nenabízí. Pro budoucí testování, kdy již nebude potřeba řešit problematiku propojení systémů, doporučuji testovat obě metody ve stejný den.

Následně jsme zhodnotili rozsahy chyb po aplikaci kompenzací. Dle těchto údajů, lepších výsledků dosáhla metoda on-the-fly. Tímto jsme vzájemně relativně posoudili obě metody. K absolutnímu porovnání bylo využito výsledků z jiného měřicího přístroje, Ballbaru. Ty naznačují, že kompenzace vytvořené pomocí obou kalibračních měření jsou téměř ekvivalentní, i když mírně lepších hodnot dosahuje metoda on-the-fly.

Na závěr došlo k posouzení rozdílu v histogramech residuí, nejistot měření a doby měření. Histogramy residuí u metody on-the-fly měly zhruba dvojnásobný rozsah, to považujeme za důsledek vlivu dynamiky při kontinuálním pohybu a nemožnosti ustálení

paprsku. Zvětšení rozsahu tedy bude pravděpodobně typickým znakem metody. U nejistot měření došlo překvapivě k minimálním změnám, čekali jsme zvětšení nejistoty v důsledku nárůstu rozsahu residuí, ale také zmenšení díky většímu počtu bodů. Zdali jsou nejistoty při této metodě softwarem správně počítány, je vhodný dotaz pro výrobce. Posledním údajem byla doba měření. V tomto případě existovala hypotéza zkrácení času měření s použitím metody on-the-fly. Pro tuto redukci je potřeba plné synchronizace propojených systémů, které se nám nepodařilo dosáhnout, a proto jsou výsledné časy této metody delší než doba měření triggerem. Na základě průběhu měření jsme však získali teoretický čas s případnou optimalizací vycházející zhruba o 43 % kratší než pomocí metody triggeru. S velikostí měřeného stroje počítáme ještě s větší redukcí potřebného času.

Můžeme tedy říci, že metoda on-the-fly je ekvivalentní se v současnosti využívanou metodu trigger a je vhodná k budoucímu testování a osvojení. Pro možné budoucí použití se zdá klíčové zkvalitnění synchronizace propojených systémů.

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MEHRABI, M., G. O'NEAL, B.-K. MIN, Z. PASEK, Y. KOREN a P. SZUBA. Improving machining accuracy in precision line boring. *Journal of Intelligent Manufacturing* [online]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 0210n. 1., 13(5), 379-389 [cit. 2016-12-28]. DOI: 10.1023/A:1019988710701. ISSN 0956-5515.
- [2] ČSN ISO 230-1. Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění. Praha: Český normalizační institut, 2014.
- [3] ČSN ISO 230-6. Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 6: Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn (Zkouška diagonálního přestavení)
- [4] Renishaw: QC20-W ballbar system. Renishaw [online]. ©2001-2017 [cit. 2017-12-28]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/qc20-w-ballbar-system--11075>
- [5] HOLUB, Michal, Josef KNOBLOCH a Jiří PERNIKÁŘ. *GTS – Testování obráběcích strojů* [Podklady k výuce]. Brno: VUT, 2015.
- [6] UNIVERSITIES RESEARCH ASSOCIATION, INC.. *Automatic ball bar for a coordinate measuring machine*. Inventor: Hans JOSTEIN. United States of America. Patent US5647136 A. 15.7.1997
- [7] WANG, Charles. Laser Vector measurement Technique for the determination and compensation of volumetric positioning errors. Part I: Basic theory. Review of scientific instruments, 2000, 71.10: 3933-3937.
- [8] ČÍP, Ondřej, Zdeněk BUCHTA. *Přesné měření délek pomocí laserové interferometrie* [Podklady k výuce]. Brno: VUT, 2011
- [9] Renishaw: XL-80 laser system. Renishaw [online]. ©2001-2017 [cit. 2017-12-28]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/xl-80-laser-system--8268>
- [10] Etalon: LaserTRACER-NG. Etalon [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.etalon-ag.com/en/products/lasertracer/>
- [11] HOLUB, Michal a Josef KNOBLOCH. Geometric accuracy of CNC machine tools. In: *Mechatronics – Mechatronika (ME), 2014 16th International Conference on* [online]. Brno University of Technology, 1412, s. 260-265 [cit. 2017-05-13]. DOI: 10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018268.
- [12] SCHWENKE, H., R. SCHMITT, P. JATZKOWSKI a C. WARMANN. On-the-fly calibration of linear and rotary axes of machine tools and CMMs using a tracking interferometer. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* [online]. Elsevier, 2009, 58(1), 477-480 [cit. 2017-02-10]. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.03.007. ISSN 0007-8506.
- [13] ETALON. Online – Help: On-the-fly Measurement on Siemens SINUMERIK controllers via SINUMERIK Operate.NET [Manuál]. Braunschweig: 2014.
- [14] SIEMENS. Sinumerik 840D sl: CNC Commissioning: NC, PLC, Drive [Manuál]. Nürnberg: 2015.
- [15] Kovosvit: MCV 754 QUICK [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/mcv-754-quick-p3.html>
- [16] Renishaw: Řada snímačů SiGNUM. Renishaw [online]. ©2001-2017 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/rada-snimacu-signum--37825>

12 SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

12.1 Seznam tabulek

Tab 1)	Technické údaje LTc	25
Tab 2)	Porovnání doby měření triggerem a time delay [11]	27
Tab 3)	Porovnání doby měření on-the fly a time delay [12]	27
Tab 4)	Materiály lineárních pravítek pro obráběcí stroje [16]	34
Tab 5)	Poloha č.1 - Umístění LTc a odražeče	36
Tab 6)	Poloha č.2 - Umístění LTc a odražeče	36
Tab 7)	Poloha č.3 - Umístění LTc a odražeče	37
Tab 8)	Poloha č.4 - Umístění LTc a odražeče	37
Tab 9)	Poloha č.5 - Umístění LTc a odražeče	38
Tab 10)	Poloha č.6 - Umístění LTc a odražeče	38
Tab 11)	Výsledky rozsahů úchylek před kompenzací	43
Tab 12)	Tabulka postupu měření s jednotlivými časy a teplotami	44
Tab 13)	Hodnoty diagnostiky Ballbaru pro rovinu XY	44
Tab 14)	Hodnoty diagnostiky Ballbaru pro rovinu YZ	44
Tab 15)	Hodnoty diagnostiky Ballbaru pro rovinu ZY	45
Tab 16)	Výsledky rozsahů úchylek s kompenzací	46
Tab 17)	Tabulka postupu měření s jednotlivými časy a teplotami	47
Tab 18)	Hodnoty diagnostiky Ballbaru pro rovinu XY	47
Tab 19)	Hodnoty diagnostiky Ballbaru pro rovinu YZ	47
Tab 20)	Hodnoty diagnostiky Ballbaru pro rovinu ZX	48
Tab 21)	Porovnání odchylek kalibrace a verifikace	55
Tab 22)	Porovnání hodnot diagnostiky Ballbaru pro rovinu XY	57
Tab 23)	Porovnání hodnot diagnostiky Ballbaru pro rovinu YZ	58
Tab 24)	Porovnání hodnot diagnostiky Ballbaru pro rovinu ZY	58
Tab 25)	Výsledky rozsahů úchylek před kompenzacemi	59
Tab 26)	Tabulka postupu měření s jednotlivými časy a teplotami	60
Tab 27)	Výsledky rozsahů úchylek s kompenzacemi	61
Tab 28)	Tabulka postupu měření s jednotlivými časy a teplotami	61
Tab 29)	Hodnoty diagnostiky Ballbaru pro rovinu XY	62
Tab 30)	Hodnoty diagnostiky Ballbaru pro rovinu YZ	62
Tab 31)	Hodnoty diagnostiky Ballbaru pro rovinu ZX	62
Tab 32)	Výsledky rozsahů úchylek před a po kompenzacích	70
Tab 33)	Porovnání hodnot diagnostiky Ballbaru pro rovinu XY	71
Tab 34)	Porovnání hodnot diagnostiky Ballbaru pro rovinu YZ	72
Tab 35)	Porovnání hodnot diagnostiky Ballbaru pro rovinu ZY	72
Tab 36)	Tabulka hodnot rozptylů úchylek pro obě kalibrační měření	80
Tab 37)	Porovnání verifikačních hodnot	81
Tab 38)	Porovnání hodnot verifikace diagnostiky Ballbaru pro rovinu XY	82
Tab 39)	Porovnání hodnot verifikace diagnostiky Ballbaru pro rovinu YZ	82
Tab 40)	Porovnání hodnot verifikace diagnostiky Ballbaru pro rovinu ZY	82
Tab 41)	Porovnání nejistot měření	86
Tab 42)	Tabulka časů měření	87

12.2 Seznam obrázků

Obr. 1) Nákres 21 parametrů tříosého stroje [2].....	17
Obr. 2) Volumetrická chyba jakož to vektor mezi skutečnou polohou (AP) a teoretickou polohou (TP) [2].....	19
Obr. 3) Schéma Ballbaru [6].....	21
Obr. 4) Princip laserového interferometru [8].....	23
Obr. 5) Vybavení Leser Interferometru Renishaw [9].....	24
Obr. 6) Sada optiky a zrcadel [9].....	24
Obr. 7) Schéma LTc [5].....	26
Obr. 8) Grafy porovnávající rozdíl průběhu jednotlivých chyb pomocí metody on-the-fly a time delay [12].....	28
Obr. 9) Realizace zapojení Ethernetového kabelu.....	29
Obr. 10) Detail terminálů X122 a X132 [14].....	30
Obr. 11) Terminál X132 (zeleně) a jeho pozice 13 a 14 (červeně).....	30
Obr. 12) Schéma propojení komponentů.....	31
Obr. 13) Trac-cal – Plan – Settings.....	33
Obr. 14) Trac-cal – Plan – Configure.....	34
Obr. 15) Adaptéry využité pro prodloužení ramene odražeče.....	35
Obr. 16) Poloha č.1 - Umístění LTc a odražeče.....	36
Obr. 17) Poloha č.2 - Umístění LTc a odražeče.....	36
Obr. 18) Poloha č.3 - Umístění LTc a odražeče.....	37
Obr. 19) Poloha č.4 - Umístění LTc a odražeče.....	37
Obr. 20) Poloha č.5 - Umístění LTc a odražeče.....	38
Obr. 21) Poloha č.6 - Umístění LTc a odražeče.....	38
Obr. 22) Trac-cal – Measure.....	39
Obr. 23) Trac-cal – Measure – Settings.....	39
Obr. 24) Trac-cal – Evaluate.....	41
Obr. 25) Trac-cal – Measure – Show results.....	41
Obr. 26) a) Tabulka výsledných rozsahů chyb (Summary), b) Vektorová mapa chyb (Error vectors).....	42
Obr. 27) Volumetrická diagnostika bez kompenzace.....	45
Obr. 28) Volumetrická diagnostika s kompenzací (trigger).....	48
Obr. 29) Graf znázorňující průběhy chyby EXX pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření.....	49
Obr. 30) Graf znázorňující průběhy chyby EYX pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření.....	49
Obr. 31) Graf znázorňující průběhy chyby EZX pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření.....	50
Obr. 32) Graf znázorňující průběhy chyby EXY pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření.....	50
Obr. 33) Graf znázorňující průběhy chyby EYY pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření.....	50
Obr. 34) Graf znázorňující průběhy chyby EZY pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření.....	51
Obr. 35) Graf znázorňující průběhy chyby EXZ pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření.....	51
Obr. 36) Graf znázorňující průběhy chyby EZX pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření.....	51
Obr. 37) Graf znázorňující průběhy chyby EZZ pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření.....	52

Obr. 38) Graf znázorňující průběhy chyby EAX pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření.....	52
Obr. 39) Graf znázorňující průběhy chyby EBX pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření.....	52
Obr. 40) Graf znázorňující průběhy chyby ECX pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření.....	53
Obr. 41) Graf znázorňující průběhy chyby EAY pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření.....	53
Obr. 42) Graf znázorňující průběhy chyby EBY pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření.....	53
Obr. 43) Graf znázorňující průběhy chyby ECY pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření.....	54
Obr. 44) Graf znázorňující průběhy chyby EAZ pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření.....	54
Obr. 45) Graf znázorňující průběhy chyby EBZ pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření.....	54
Obr. 46) Graf znázorňující průběhy chyby ECZ pro kalibrační (modrá) a verifikační (červená) měření.....	55
Obr. 47) Grafické znázornění odchylek kalibrace a verifikace.....	56
Obr. 48) Znázornění kompenzace kolmosti	56
Obr. 49) Vektorová mapa před s po kompenzaci.....	57
Obr. 50) Volumetrická diagnostika s kompenzací (on-the-fly)	63
Obr. 51) Graf znázorňující průběhy chyby EXX pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření	63
Obr. 52) Graf znázorňující průběhy chyby EYX pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření	64
Obr. 53) Graf znázorňující průběhy chyby EZX pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření	64
Obr. 54) Graf znázorňující průběhy chyby EXY pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření	64
Obr. 55) Graf znázorňující průběhy chyby EYY pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření	65
Obr. 56) Graf znázorňující průběhy chyby EZY pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření	65
Obr. 57) Graf znázorňující průběhy chyby EXZ pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření	65
Obr. 58) Graf znázorňující průběhy chyby EYZ pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření	66
Obr. 59) Graf znázorňující průběhy chyby EZZ pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření	66
Obr. 60) Graf znázorňující průběhy chyby EAX pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření	66
Obr. 61) Graf znázorňující průběhy chyby EBX pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření	67
Obr. 62) Graf znázorňující průběhy chyby ECX pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření	67
Obr. 63) Graf znázorňující průběhy chyby EAY pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření	67
Obr. 64) Graf znázorňující průběhy chyby EY pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření	68

Obr. 65) Graf znázorňující průběhy chyby ECY pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření	68
Obr. 66) Graf znázorňující průběhy chyby EAZ pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření	68
Obr. 67) Graf znázorňující průběhy chyby EBZ pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření	69
Obr. 68) Graf znázorňující průběhy chyby ECZ pro kalibrační (zelená) a verifikační (žlutá) měření	69
Obr. 69) Grafické znázornění odchylek kalibrace a verifikace	70
Obr. 70) Vektorová mapa před a po kompenzací	71
Obr. 71) Graf znázorňující průběhy chyby EXX pro verifikační měření Trigger (modrá) a On the fly (zelená)	73
Obr. 72) Graf znázorňující průběhy chyby EYX pro verifikační měření Trigger (modrá) a On the fly (zelená)	73
Obr. 73) Graf znázorňující průběhy chyby EZX pro verifikační měření Trigger (modrá) a On the fly (zelená)	74
Obr. 74) Graf znázorňující průběhy chyby EXY pro verifikační měření Trigger (modrá) a On the fly (zelená)	74
Obr. 75) Graf znázorňující průběhy chyby EYY pro verifikační měření Trigger (modrá) a On the fly (zelená)	74
Obr. 76) Graf znázorňující průběhy chyby EZY pro verifikační měření Trigger (modrá) a On the fly (zelená)	75
Obr. 77) Graf znázorňující průběhy chyby EXZ pro verifikační měření Trigger (modrá) a On the fly (zelená)	75
Obr. 78) Graf znázorňující průběhy chyby EYZ pro verifikační měření Trigger (modrá) a On the fly (zelená)	75
Obr. 79) Graf znázorňující průběhy chyby EZZ pro verifikační měření Trigger (modrá) a On the fly (zelená)	76
Obr. 80) Graf znázorňující průběhy chyby EAX pro verifikační měření Trigger (modrá) a On the fly (zelená)	76
Obr. 81) Graf znázorňující průběhy chyby EBX pro verifikační měření Trigger (modrá) a On the fly (zelená)	76
Obr. 82) Graf znázorňující průběhy chyby ECX pro verifikační měření Trigger (modrá) a On the fly (zelená)	77
Obr. 83) Graf znázorňující průběhy chyby EAY pro verifikační měření Trigger (modrá) a On the fly (zelená)	77
Obr. 84) Graf znázorňující průběhy chyby EBY pro verifikační měření Trigger (modrá) a On the fly (zelená)	77
Obr. 85) Graf znázorňující průběhy chyby ECY pro verifikační měření Trigger (modrá) a On the fly (zelená)	78
Obr. 86) Graf znázorňující průběhy chyby EAZ pro verifikační měření Trigger (modrá) a On the fly (zelená)	78
Obr. 87) Graf znázorňující průběhy chyby EBZ pro verifikační měření Trigger (modrá) a On the fly (zelená)	78
Obr. 88) Graf znázorňující průběhy chyby ECZ pro verifikační měření Trigger (modrá) a On the fly (zelená)	79
Obr. 89) Gaussova křivka	83
Obr. 90) Histogramy residuí pro pozici 1	83
Obr. 91) Histogramy residuí pro pozici 2	83
Obr. 92) Histogramy residuí pro pozici 3	84

Obr. 93) Histogramy residuí pro pozici 4	84
Obr. 94) Histogramy residuí pro pozici 5	84
Obr. 95) Histogramy residuí pro pozici 6	85
Obr. 96) Histogramy residuí pro všechny pozice.....	85