



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

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

PRACOVNÍ PŘESNOST OBRÁBĚCÍHO STROJE MCV 754

WORKING ACCURACY MACHINE MCV 754

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ROMAN KAŇA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing., Dipl.-Ing MICHAL HOLUB, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Roman Kaňa

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

obor: **Výrobní stroje, systémy a roboty (2301T041)**

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:

Pracovní přesnost obráběcího stroje MCV 754

v anglickém jazyce:

Working accuracy machine MCV 754

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce je popsat problematiku pracovní přesnosti obráběcího stroje MCV 754 založené jak na teoretických znalostech, tak z provedených experimentů.

Cíle diplomové práce:

- teoretické zpracování částí práce zaměřené na pracovní přesnost a definování požadavků na experimentální část práce
- zpracování získaných informací z provedených experimentů
- podrobné zhodnocení výsledků



doc. Ing. Jaroslav Katoňský, Ph.D.
Děkan

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

Seznam odborné literatury:

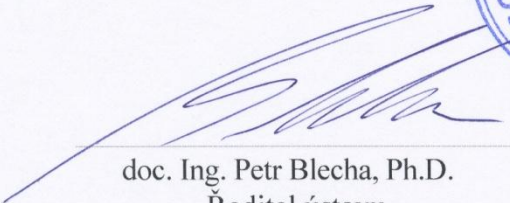
- www.infozdroje.cz
- Marek J, Novotný L, Smolík J, Blecha P, Březina T, Sulitka M, et al. (2010). Konstrukce CNC obráběcích strojů (MM Speciál., p. 420). Praha: MM publishing, s.r.o.
- Berník P, Píč J., Obráběcí stroje - konstrukce a výpočty. 2. vyd. Praha: SNTL, 1986. 573 s. ISBN 04-235-86
- Weck M, Brecher Ch, Werkzeugmaschinen: Konstruktion und Berechnung. 2006. uberarb. Auflage. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2006. 701 s. ISBN 3-540-22502-1.

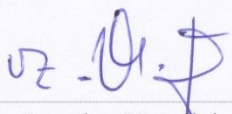
Vedoucí diplomové práce: Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.


Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 24.11.2014




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


doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan

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

ABSTRAKT

Bc. Roman Kaňa

Pracovní přesnost obráběcího stroje MCV 754

Diplomová práce, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, 2015.

Diplomová práce má za cíl zjistit vliv volumetrických kompenzací na výslednou pracovní přesnost stroje. V práci je popsán postup měření stroje pomocí Ballbaru a Laser Traceru, kompenzace chyb stroje a dále návrh, obrobení a kontrola zkušebního obrobku. V závěru je na základě výsledků zhodnocen přínos volumetrických kompenzací pro zvýšení přesnosti měřeného stroje.

KLÍČOVÁ SLOVA

pracovní přesnost, volumetrická přesnost, laser tracer, vertikální frézka

ABSTRACT

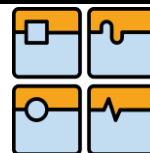
Bc. Roman Kaňa

Working accuracy machine MCV 754

Main aim of this diploma thesis is to find out the influence of volumetric compensations to working accuracy. This thesis consists of detail description of measuring with the aid of Ballbar and Laser Tracer, error compensation of the machine and also designing, machining and measuring of the control work-piece. According to results there is also evaluation of volumetric compensation benefits leading to increasing the working accuracy of measured machine.

KEYWORDS

working accuracy, volumetric accuracy, laser tracer, vertical milling machine



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE


KAŇA, R. Pracovní přesnost obráběcího stroje MCV 754. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing., Dipl.-Ing. Michal Holub Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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 3. června 2015

.....
Bc. Roman Kaňa

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 7
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	


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 příspěví MŠMT v rámci účelové podpory programu NPU I.


Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu této práce, Ing. Michalu Holubovi, Ph.D. za pomoc při měření a také za jeho čas věnovaný konzultacím a metodickému vedení, které vedlo k sepsání této práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Tůmovi za pomoc při obrábění kontrolních obrobků a Ing. Jiřímu Zahálkovi za realizaci měření na CMM stroji.

OBSAH

Úvod.....	11
1 Přesnost obráběcího stroje	13
1.1 Geometrická přesnost obráběcího stroje	13
1.1.1 Odchytky pohybu lineární osy	14
1.1.2 Odchytky pohybu rotační osy	15
1.1.3 Volumetrické chyby.....	15
1.2 Přesnost polohování	16
1.3 Pracovní přesnost	16
1.4 Výrobní přesnost	16
2 Použité měřicí zařízení.....	17
2.1 Ballbar	17
2.1.1 Souprava QC20-W.....	18
2.2 Laser tracer.....	19
2.2.1 Princip laserinterferometru	19
2.2.2 Princip trilaterace	20
2.2.3 Měřicí přístroj laser tracer.....	21
2.3 Testo Saveris	22
2.4 CMM Mitutoyo Crysta-Plus M544.....	24
3 Experiment.....	27
3.1 Demonstrátor.....	28
3.2 Software Renishaw Ballbar 20.....	29
3.3 Software Trac-cal	33
3.3.1 Plan	33
3.3.2 Measure.....	39
3.3.3 Evaluate	40
3.3.4 Qualify	43
4 Vyhodnocení.....	45
4.1 Kalibrační měření.....	45
4.1.1 Ballbar.....	45
4.1.2 Laser tracer	46
4.2 Verifikační měření	48
4.2.1 Ballbar.....	48
4.2.2 Laser tracer	49
4.3 Porovnání výsledků kalibrace a verifikace	51
4.3.1 Ballbar.....	51

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

4.3.2	Laser tracer.....	52
4.4	Kontrolní obrobek	56
4.4.1	Návrh kontrolního obrobku.....	56
4.4.2	Obrábění.....	59
4.4.3	Měření na CMM stroji	61
	Závěr	65
	Použité informační zdroje	67
	Seznam obrázků	68
	Seznam tabulek	69
	Seznam příloh	70

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 11
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	


ÚVOD

Důvodem vzniku této práce je rostoucí zájem o praktické využití volumetrických kompenzací jak ze strany výrobců obráběcích strojů, tak také ze strany uživatelů. Je to důsledek snahy o snižování nákladů při konstrukci, ale stejně tak při používání ve výrobě. Použitím volumetrických kompenzací jsme schopni zvýšit přesnost polohování stroje v celém pracovním prostoru na takovou úroveň, která se blíží výrazně dražším strojům s vyšší, výrobcem deklarovanou, přesností.

Hlavním cílem práce je zjistit vliv použití volumetrických kompenzací na přesnost výsledného obrobku u obráběcího stroje s poměrně malým pracovním prostorem. Jedná se o stroj MCV 754 Quick od firmy Kovošvit MAS, který má Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky k dispozici. A na základě výsledků měření stroje a kontrolních obrobků rozhodnout o vhodnosti použití volumetrických kompenzací pro daný stroj a konkrétní aplikaci.

Nejprve budou vysvětleny některé pojmy týkající se měření přesnosti obráběcích strojů. Jedná se o rozdělení jednotlivých druhů přesností, popis jednotlivých chyb vznikajících u obráběcích strojů a v neposlední řadě také vysvětlení principu volumetrické kompenzace. Všechny použité měřicí zařízení, jako např. Ballbar a Laser Tracer, jsou detailně popsány, včetně vysvětlení principu jejich fungování a ovládání k nim dodávaného softwaru. Po zpracování výsledků měření stroje následuje návrh vhodného tvaru kontrolního obrobku, obrábění dvou kontrolních obrobků, jeden před a druhý po aktivaci volumetrických kompenzací. Dalším bodem je kontrola přesnosti tvaru obrobku pomocí souřadnicového měřicího stroje, který je také na Fakultě strojního inženýrství k dispozici. Na závěr jsou zhodnoceny a porovnány výsledky jednotlivých měření stroje i obrobků.

Vzhledem k několika problémům, které v průběhu praktické části práce nastaly a jsou popsány včetně návrhů, jak jim při opakování experimentu předejít, nebylo zformulování závěru a stanovisko k použití volumetrických kompenzací na měřeném stroji úplně jednoznačné. Závěr odpovídá a platí pro výsledky konkrétního měření při specifické aplikaci stroje.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 13
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

1 PŘESNOST OBRÁBĚCÍHO STROJE

Obecný pojem přesnost obráběcího stroje je možné rozdělit do podskupin, z nichž každá popisuje přesnost určité konstrukční nebo funkční části stroje. Jednotlivé podskupiny na sebe přímo navazují a každá následující přímo závisí a je ovlivněna předcházející. Tyto skupiny jsou následující:

- **GEOMETRICKÁ PŘESNOST**
- **PŘESNOST POLOHOVÁNÍ**
- **PRACOVNÍ PŘESNOST**
- **VÝROBNÍ PŘESNOST**

1.1 GEOMETRICKÁ PŘESNOST OBRÁBĚCÍHO STROJE

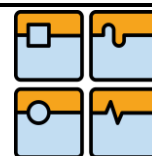
Přesnost obráběcího stroje je dána geometrickou přesností, do které patří odchylky tvaru a polohy funkčních částí stroje (týkají se pouze jednoho prvku), dále pak vzájemnou polohou funkčních částí nebo ploch. Při měření geometrické přesnosti kontrolujeme[2]:

- přímost
- rovnoběžnost
- kolmost
- rovinnost
- souosost
- čelní házení
- obvodové házení
- osovou vůli
- osový pohyb

Geometrickou přesnost je na stroji potřeba měřit za klidu nebo při volném chodu naprázdno. U některých druhů strojů (např. u vrtaček) se různé části stroje zatěžují, zejména tehdy, ověřuje-li se měřením tuhost stroje. Takzvanou funkční zkouškou se ověřují výsledky měření geometrické přesnosti. Přesnost stroje je výrazně ovlivněna také teplotou, proto při měření přesnosti stroje mají mít jednotlivé části teplotu, odpovídající normálním pracovním podmínkám, tj. při zatížení a při normálním oběhu mazacího oleje. Při měření by měl být stroj chráněn před přímým vlivem tepla a slunečních paprsků[2].

Nejvýznamnějším činitelem, který ovlivňuje přesnost je prvotní ustavení stroje, dále je to zvláště zatížení stroje, zrychlení pohybujících se hmot a změna procesních sil. Negativním vlivem je samobuzené kmitání, které ovlivňuje velikost deformace stroje v závislosti na jeho dynamické poddajnosti[1].

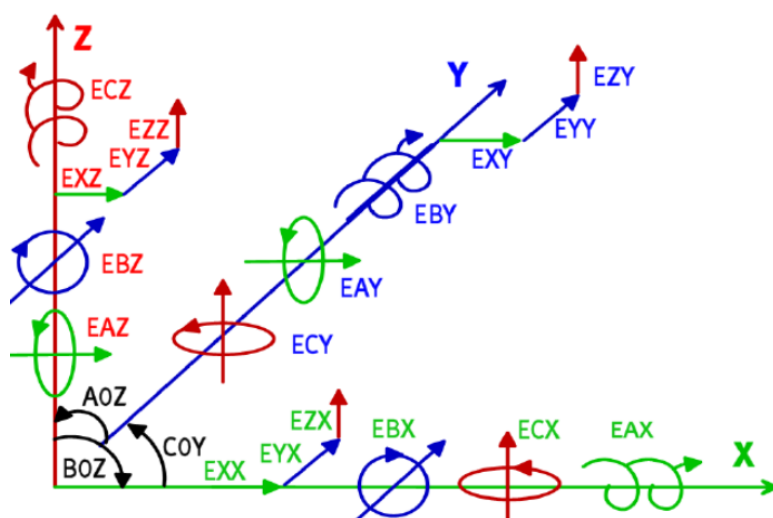
Chyby v obrábění jsou rozděleny mezi chyby náhodné a systematické. Náhodné chyby jsou způsobeny kombinací více faktorů, např. vůle v uložení, tření, nepřesnost měřicího zařízení atd. a mají Gaussovo normální rozdělení. Na druhé straně systematické chyby posouvají střed rozložení jedním nebo druhým směrem. Jsou způsobeny statickou poddajností, tepelnou roztažností konstrukce obráběcího stroje při obrábění atd.



Geometrické chyby spadají pod tuto kategorii, způsobují systémové odchylky rozměrů obrobku a jsou ze své podstaty pozičně závislé[3].

1.1.1 ODCHYLKY POHYBU LINEÁRNÍ OSY

Jedná se o nechtěné lineární a úhlové pohyby součásti při pohybu podél nominální (přímkové) trajektorie (Obr. 1.1). Pro libovolný bod, který leží na ose X , můžeme identifikovat šest různých geometrických odchylek, odpovídající počtu stupňů volnosti. Bude-li se prvek pohybovat, rozlišujeme tři translační odchylky a tři úhlové odchylky. Identicky je tomu tak i v ose Y a Z [7]. Jednotlivé chyby, které mohou při pohybu v lineární ose vzniknout jsou pospány pod obrázkem[4]:



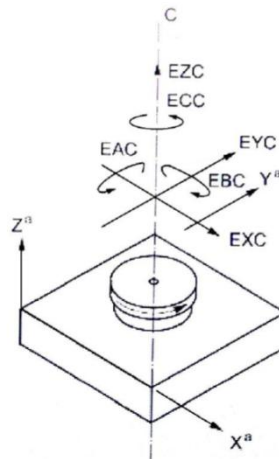
Obr. 1.1 Schéma odchylek tříosé kinematiky[4]

- EXX – přesnost najetí do polohy v ose X
- EYY – přesnost najetí do polohy v ose Y
- EZZ – přesnost najetí do polohy v ose Z
- EYX – odchylka přímosti Y ve směru osy X
- EZX – odchylka přímosti Z ve směru osy X
- EXY – odchylka přímosti X ve směru osy Y
- EZY – odchylka přímosti Z ve směru osy Y
- EXZ – odchylka přímosti X ve směru osy Z
- EYZ – odchylka přímosti Y ve směru osy Z
- EAX – naklápění ve směru osy X („roll“)
- EBX – klopení ve směru osy X („pitch“)
- ECX – natáčení ve směru osy X („yaw“)
- EAY – naklápění ve směru osy Y („roll“)
- EBY – klopení ve směru osy Y („pitch“)
- ECY – natáčení ve směru osy Y („yaw“)
- EAZ – naklápění ve směru osy Z („roll“)
- EBZ – klopení ve směru osy Z („pitch“)
- ECZ – natáčení ve směru osy Z („yaw“)
- A0Z – kolmost v rovině Y - Z
- B0Z – kolmost v rovině Z - X
- C0Y – kolmost v rovině X - Y



1.1.2 ODCHYLKY POHYBU ROTAČNÍ OSY

Do této kategorie je možné zařadit změny v poloze a orientaci os otáčení vzhledem k průměrné přímce osy jako funkce úhlu otáčení osy otáčení (Obr. 1.2). I v tomto případě existuje šest odchylek. Pohybová osa je tvořena rotační osou C . Axiální pohyb tvoří translační odchylka EZC . Radiální chyba pohybu je způsobena odchylkami EXC a EYC . Naklápění rotační osy C ve směrech os x a y je vyznačeno EAC a EBC . Chyba v polohování je způsobena odchylkou ECC [4].



Obr. 1.2 Odchylky rotační osy[8]


1.1.3 VOLUMETRICKÉ CHYBY

Dnes má velký význam přesnost polohování měřená ne odděleně v jednotlivých osách, ale při jejich součinnosti v prostoru. Jedná se o tzv. volumetrickou přesnost. Technický výbor Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO) již několik let pracuje na publikaci nové normy, která bude sloužit pro numerickou kompenzaci geometrických chyb u obráběcích strojů. Tato norma má v úmyslu poskytnout informace pro jednotnou identifikaci a charakterizaci geometrických chyb numericky řízeného stroje[9].

Pro tříosý obráběcí stroj byla volumetrická přesnost nejprve definována jako odmocnina ze součtu druhých mocnin rozdílu maximální a minimální hodnoty přesnosti najetí do polohy v jednotlivých osách X , Y a Z . Tato definice byla dostačující do doby, kdy se začali více využívat parametry přímosti a rovinnosti. Následně byla zavedena nová definice, která zahrnuje chybu polohy v každém směru pro všechny osy. Ovšem při používání interferometru pro měření přímosti a rovinnosti bylo měření časově náročné. Z tohoto důvodu byla měření prováděna podle normy (ISO 230-6 - Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn), to zajistilo přesnou kontrolu volumetrických chyb[9].

Volumetrické chyby zahrnují chyby polohové, chyby rovinnosti, kolmosti a úhlové chyby. Volumetrická přesnost je reprezentována mapou pozic a orientací chybových vektorů nástroje při pohybu v prostoru obráběcího stroje. Existují dva způsoby měření volumetrické přesnosti ve směru prostorové diagonály pracovního prostoru obráběcího centra[9]:

- souvislý způsob měření diagonály,
- sekvenční způsob měření diagonály – při měření tímto způsobem je nashromážděno 3x více dat a mohou být měřeny všechny složky celkové chyby.

Str. 16	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Nejvyšším přínosem volumetrických kompenzací je jednoznačně zmapování geometrických chyb u velkých obráběcích strojů a center. U těchto typů strojů se nejčastěji projevuje chyba kolmosti při pohybu v lineární ose. V případě pětiosých strojů se tato chyba nejvíce projevuje při pohybu rotační osy v závislosti na zvětšující se vzdálenosti. Maximálního přínosu volumetrické kompenzace lze dosáhnout právě při minimalizaci úhlových a rotačních chyb[9].

1.2 PŘESNOST POLOHOVÁNÍ

Popisuje přesnost a opakovatelnost najetí do požadované polohy u lineárních a rotačních číslicově řízených osách. „Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách“ je popsáno normou ISO 230-2/6 [16].

1.3 PRACOVNÍ PŘESNOST

Pracovní přesnost stroje je ovlivňována přesností relativní dráhy nástroje – geometrickou přesností stroje, přesností nastavování polohy nástroje vzhledem k obrobku (přesnost polohování), odolností stroje vůči pružným deformacím (vyvolaných řeznými silami, hmotností obrobku apod.), odolností stroje vůči teplotním dilatacím („teplotní stabilita“), volbou řezných podmínek, apod. [16].

1.4 VÝROBNÍ PŘESNOST

Popisuje přesnost výrobního procesu hodnocené na obrobku. Výrobní přesnost je ovlivněná geometrickou přesností, přesností polohování, pracovní přesností a dále chybami vzniklými od obsluhy a změnou okolních podmínek. Přímou informaci o výrobní přesnosti udávají výkyvy rozměrů zkušebních obrobků během výrobního procesu [16].



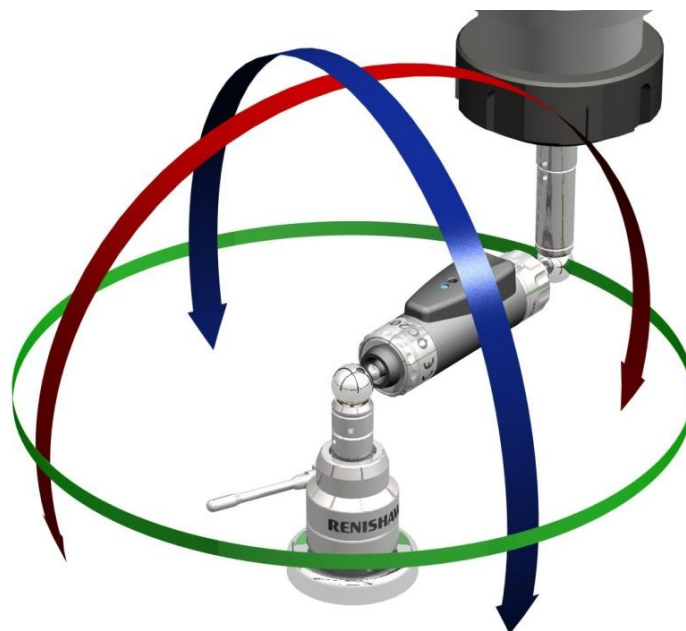
2 POUŽITÉ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ

V této kapitole jsou popsány a vysvětleny principy fungování měřicích zařízení, z jejichž pomoci jsem provedl měření jednak samotného obráběcího stroje, ale také kontrolu zkušebního obrobku. Veškeré vybavení je popisováno v pořadí, ve kterém bylo v průběhu času použito při měření pro účely této diplomové práce.

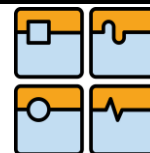
2.1 BALLBAR

Systém ballbar QC20-W společnosti Renishaw je složen ze samotného ballbaru (jedná se o velmi přesný teleskopický lineární snímač a dvojici přesných kuliček na obou jeho koncích) a z přesných magnetických držáků, z nichž jeden (nastavitelný) je připevněný ke stolu stroje a druhý k vřetenu stroje nebo tělu vřetena. Za provozu jsou kuličky snímače kinematically vedeny v magnetických miskách. Díky tomuto uspořádání je ballbar schopen měřit i nepatrné změny poloměru naprogramované kruhové dráhy kolem držáku umístěného na stole stroje. Měření volumetrické přesnosti umožňuje testování ve 3 navzájem kolmých rovinách pomocí jediného referenčního bodu[5].

Nasnímaná data jsou odeslána do počítače, ve kterém software Renishaw vypočítá celkové hodnoty přesnosti (kruhovitost, odchylka kruhovitosti) v souladu s mezinárodními normami jako je ISO 230-4 a ASME B5.54, případně vlastními analytickými protokoly společnosti Renishaw. Tyto protokoly využívají specifickou matematickou analýzu k diagnostikování dalších chyb daného stroje ze sady lineárních naměřených hodnot. Data jsou zobrazena graficky a také v číselném formátu jakožto pomůcka a podpora pro diagnostiku[5].



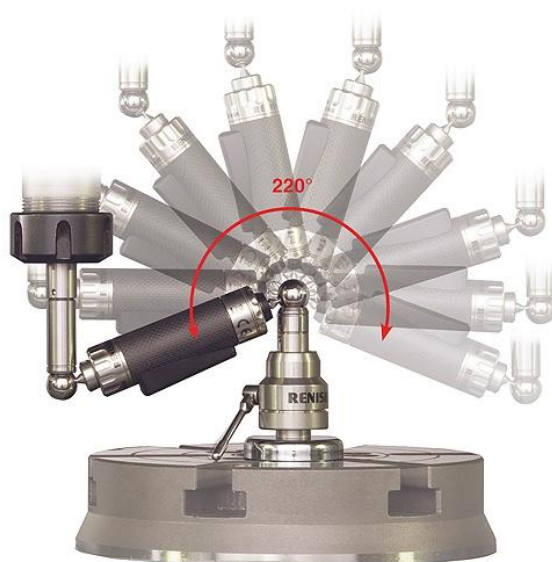
Obr. 2.1 Renishaw Ballbar QC20-W[5]



2.1.1 SOUPRAVA QC20-W

Běžná souprava QC20-W obsahuje sestavu 100 mm dlouhého ballbaru a prodlužovací nástavce v délkách 50, 150 a 300 mm. Po sestavení ballbaru s různými kombinacemi prodlužovacích nástavců lze provádět testy o poloměru 100, 150, 250, 300, 400, 450, 550 a 600 mm[5].

Kuličkové držáky nové konstrukce (včetně nového středového otočného čepu a prodlužovacího nástavce nástrojové misky) umožňují provádění testů 220°v rovinách procházejících osou středového otočného čepu. To znamená, že systémem ballbar můžete testovat ve třech kolmých rovinách, aniž je nutné přemístit středový upínač, což urychluje testování (jsou-li prováděny testy s poloměrem větším než 150 mm, je požadováno běžné upnutí) [5].



Obr. 2.2 Renishaw Ballbar QC20-W, úhlový rozsah[5]

Výsledky lze použít pro novou funkci přehledu volumetrické analýzy se zárukou, že všechna data byla shromážděna okolo stejného bodu.

Tab. 2.1 Technické parametry systému ballbaru QC20-W[5]

Rozlišení snímače	0,1 μm
Přesnost měření ballbar*	$\pm (0,7 + 0,3\% L) \mu\text{m}$
Rozsah měření softwaru Ballbar	$\pm 1,0 \text{ mm}$
Zdvih snímače	-1,25 mm až +1,75 mm
Max. rychlost snímání	1 000 Hz
Dosah přenosu dat (Bluetooth, třída 2)	zpravidla 10 m
Pracovní rozsah teplot	0 °C – 40 °C


* rovněž se označuje jako „radiální odchylka měření“

Platné 15 °C – 25 °C

L = délka, na které je chyba měřena

tzn. specifikace při měření chyby 10 μm na stroji $\pm 0,73 \mu\text{m}$

Specifikace při měření chyby 100 μm na stroji $\pm 1,00 \mu\text{m}$

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 19
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

2.2 LASER TRACER

Pro měření volumetrické přesnosti je jedním z nejvhodnějších měřicích přístroj Laser Tracer. Díky němu je možné získat úplný obraz přesnosti v celém pracovním prostoru stroje. Výstupem je kompletní zmapování chyb pomocí matematické metody Monte Carlo. Matematická metoda Monte Carlo je stochastická metoda používaná pro odhad nejistoty měření. Do matematického modelu vstupují náhodné veličiny a metoda sleduje jejich výstupy[9].

Tracer provádí prostorovou kalibraci obráběcích strojů plně ve 3D, což je v dnešní době obrovskou výhodou. Jedná se o jedinečnost přístroje, protože žádný jiný systém toto neumožňuje. Stejně tak, jako přímé zadávání korekcí do řídicích systémů obráběcích strojů mnoha světových výrobců [10].

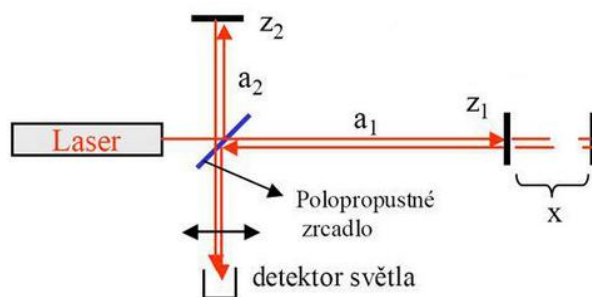
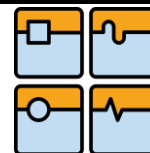
Měření je založeno na dvou principech, prvním je laserinterferometrie a druhým trilaterace. Základním prvkem laser traceru je laserový interferometr s nanometrovým rozlišením. Ten automaticky sleduje odrazeč a měří vzdálenost. Jedná se o vlastní sledování umožňující měření vzdálenosti s nejvyšší přesností v téměř každém směru. Odrazeč je uchycen ve snímací hlavě souřadnicového měřicího stroje nebo ve vřetenu obráběcího stroje. Dráha, kterou kalibrovaný stroj projede, je navržena uživatelem. Nakonec je vygenerována korekční mapa a korekce jsou přímo uloženy do řídicí jednotky měřeného obráběcího stroje [10].

2.2.1 PRINCIP LASERINTERFEROMETRU

Světelný svazek vystupující z laseru si můžeme představit jako světelnou vlnu se sinusovým průběhem. Světelná vlna je charakterizována třemi základními vlastnostmi [9]:

- přesně známá vlnová délka záření,
- velmi malá vlnová délka umožňuje měřit s vysokým rozlišením,
- všechny světelné vlny mají stejnou fázi a umožňují vznik interference.

Princip laserinterferometru je popsán na obrázku (Obr. 2.3). Ze zdroje vychází paprsek monochromatického světla a dopadá na slabě postříbřenou polopropustnou destičku nastavenou pod úhlem 45° ke směru paprsku. Na destičce se paprsek rozdělí na dva vzájemně kolmé paprsky. Paprsek, který projde destičkou, následně dopadá na pohyblivé zrcadlo Z1. Odražený paprsek dopadá na zrcadlo fixní Z2. Po odrazu na zrcadlech se oba paprsky vrátí na polopropustnou destičku, kde se opět rozdělí. Část paprsků se vrací do zdroje a část postupuje směrem k detektoru s fotocitlivými prvky, kde se detekuje interference paprsků. Interferometrie vyjadřuje vzájemné ovlivňování, prolínání nebo střetání se jevů či hmoty. V tomto případě paprsků. Při jejich pohybu a prolínání se v určitém bodě vzájemně zesilují, zatímco v jiných bodech vzájemně ruší. Počet interferenčních proužků prošlých přes štěrbinu fotodetektoru odpovídá míře změny délky dx [1].



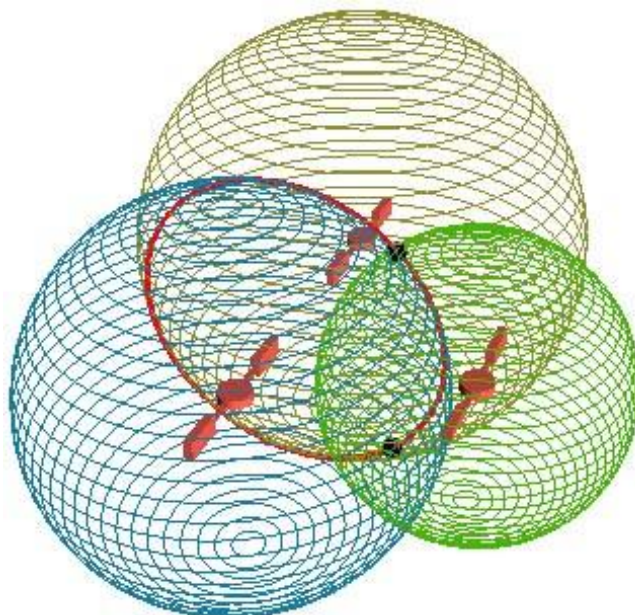
Obr. 2.3 Princip fungování interferometru

Vlnová délka laserového paprsku ve vzduchu závisí na indexu lomu vzduchu. Index lomu vzduchu je funkcí teploty, tlaku, vlhkosti a jeho složení. Nejistotu měření ovlivňuje též znečištění optické cesty mezi laserem, interferometrem a odražečem a dále skutečná teplota měřeného předmětu. Vlnová délka laserového záření vzroste o 1 μm těmito změnami atmosférických podmínek [9]:

- 1 $^{\circ}\text{C}$ nárůst teploty vzduchu,
- 3,7 millibaru pokles tlaku vzduchu,
- 30 % pokles relativní vlhkosti.

2.2.2 PRINCIP TRILATERACE

Trilaterace je způsob výpočtu polohy na principu kreslení průsečíků kružnic nebo koulí. Při znalosti vzdálenosti od jedné měřicí pozice se předpokládá, že měřený bod se nachází v místě povrchu koule. Pokud k tomu přidáme vzdálenost od druhé měřicí pozice, poloha měřeného bodu se zredukuje na kružnici, která je průnikem těchto dvou koulí. Koule, vytvořená z místa třetí měřicí pozice, vymezení pouze dvě možné polohy měřeného bodu. Jedna z nich se nachází mimo měřicí prostor stroje a pro měření je tedy nepoužitelná. Druhá poloha je zaznamenána a zpracována. Tohoto principu využívají GPS přístroje pro zaznamenání polohy na povrchu Země [12].

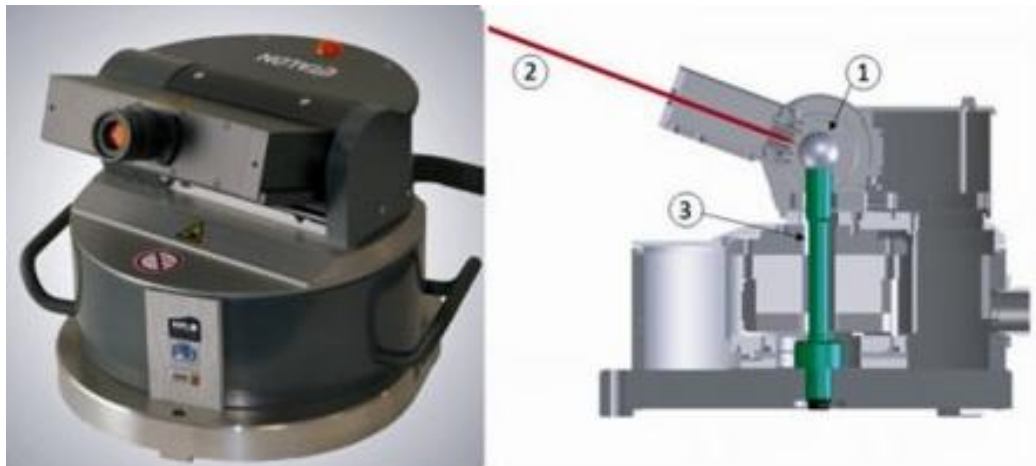


Obr. 2.4 Princip trilaterace u GPS



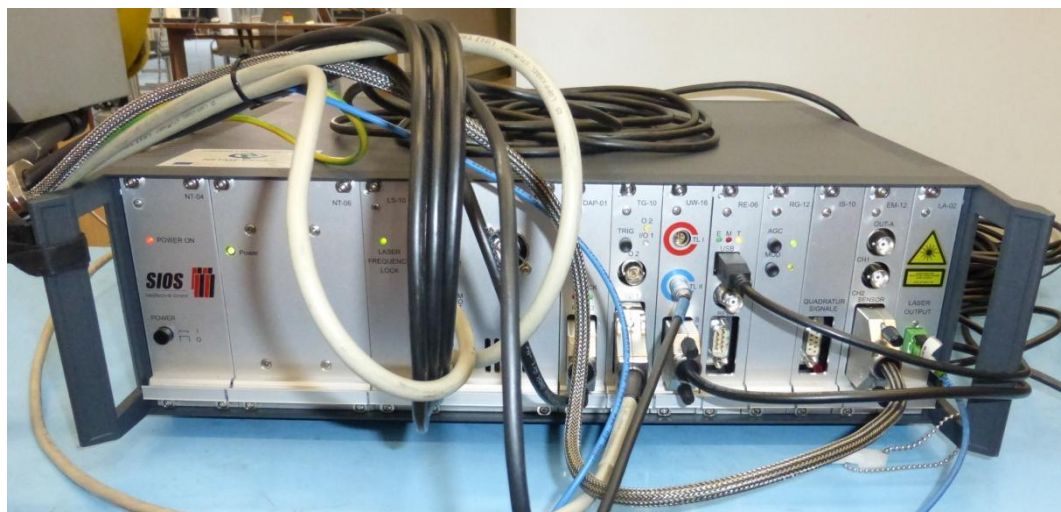
2.2.3 MĚŘICÍ PŘÍSTROJ LASER TRACER

Hlavní výhodou laser traceru je možnost sledování bodu na libovolné dráze v prostoru. V kombinaci se softwarem Trac-cal je kalibrace možná v extrémně rychlém čase, jednoduše a velmi přesně. Na (obrázku) je schematicky popsán laser tracer. Číslo 1 označuje patentovou referenční kouli s odchylkou $< 0,050 \mu\text{m}$, číslo 2 je měřicí paprsek interferometru s přesností $0,001 \mu\text{m}$, a číslem 3 je zobrazen pevný čep [13].

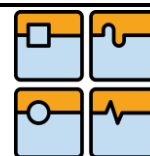


Obr. 2.5 Laser tracer [13]

Laserový paprsek je vytvořen v externí jednotce od německé firmy SIOS (Obr. 2.6). Jedná se o HeNe (helium-neonový) laser. Do samotného Laser traceru je paprsek veden optickým kabelem. Vlnová délka laseru je $632,8\text{nm}$. Do externí jednotky je také přiveden signál ze stroje, pokud je použito triggerovací zařízení, tak jako v našem případě. Použití triggerování výrazně zkracuje čas potřebný pro měření [4].



Obr. 2.6 Externí jednotka Laser Traceru od firmy SIOS



Tab. 2.2 Technické parametry Laser traceru[4]

Nejistota měření v prostoru(95%)	0,2 μm + 0,3 $\mu\text{m}/\text{m}$
Rozlišení	0,001 μm
Rozsah měření	0,2 –20 m
Úhlový rozsah osy azimutu	-225° to 225°
Úhlový rozsah elevační osy	-35° to 85°
Hmotnost	15 kg
Třída laseru	2 M
Vlnová délka laseru	632,8 nm

Firma Etalon AG vyrábí Laser Tracer ve dvou provedeních. Pro kalibraci menších nebo středně velkých obráběcích center poskytuje Laser tracer-MT (mechanical tracking). Ten se využívá pro měření strojů s pracovním rozsahem od 0,3 do 1 metru. Přístroj je spojen s obráběcím strojem pomocí velice přesných kulových kloubů a vícestupňový teleskopický systém je zodpovědný za sledování interferometru. Uvnitř každého prvku teleskopického systému jsou speciální části, které jej chrání před nečistotami a poškozením. Vliv podmínek prostředí je kompenzován užitím teplotních a tlakových senzorů [4].

2.3 TESTO SAVERIS

Teplotu během měření jsem sledoval a zaznamenával pomocí systému Saveris od firmy Testo. Báze je srdcem systému Testo Saveris a může nezávisle na počítači ukládat pro každý kanál 40 000 naměřených hodnot. To odpovídá kapacitě paměti přibližně v délce jednoho roku při intervalu měření 15minut. Na displeji báze Saveris je možné vidět systémová data a také alarmy [14].

Tab. 2.3 Technická data Testo Saveris [14]

Paměť	40 000 hodnot/kanál (celk. max. 18 000 000 hodnot)
Rozměry	225 x 150 x 49 mm
Hmotnost	cca 1510 g
Materiál pouzdra	zinkový tlakový odlitek / plast
Rádiová frekvence	868 MH
Provozní teplota	-10 ... +50 °C
Rozhraní	USB, rádiový signál, Ethernet
Připojitelné rádiové sondy	max. 15 sond přímo připojitelných přes rádiové rozhraní, max. 150 celkem přes rádiový signál / router / konvertor / Ethernet / extender max. 450 kanálů

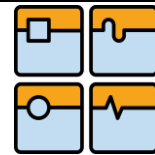


Obr. 2.7 Testo Saveris báze

Na každou osu vertikální frézky jsem umístil jednu sonda Saveris PtD. Teplotní snímače musí být co nejbližší pravítek na jednotlivých osách (Obr.2.8 až Obr.2.10). Zároveň bylo třeba dbát na to, aby sondy nepřekážely v pracovním prostoru stroje během samotného měření.



Obr. 2.8 Sonda Testo Saveris PtD, osa X



Obr. 2.9 Sonda Testo Saveris PtD, osa Y



Obr. 2.10 Sonda Testo Saveris PtD, osa Z

2.4 CMM MITUTOYO CRYSTA-PLUS M544


Rozměrovou a geometrickou přesnost kontrolních obrobků jsem kontroloval pomocí CMM (coordinate measuring machine) stroje od firmy Mitutoyo. Jedná se o tříosý souřadnicový manuálně nastavitelný, dotykový měřicí stroj. Konkrétně se jedná o typ Crysta-Plus M544 (Obr.2.11). Na stroji jsou na všech osách použita vysoce přesná, proti prachu chráněná skleněná odměřovací pravítka, s rozlišením 0,5 μ m a dále samoseřizovací vzduchová ložiska [15].



Obr. 2.11 Souřadnicový měřicí stroj Mitutoyo Crysta-Plus M544 [15]

Tab. 2.4 Technická data Mitutoyo Crysta-Plus M544 [15]

Měřicí rozsah	osa X	500 mm
	osa Y	400 mm
	osa Z	400 mm
Měřený dílec	max. výška	510 mm
	max. váha	180 kg
Možnost upnutí dílce	Počet závitů M8	9
Délková odchylka měření	ISO 10360-2 (20°C± 1°C)	$MPE_E=(3,5+0,45 L / 100) 0,5\mu\text{m}$
Chyba sondy	ISO 10360-2	$MPE_E=(4,5+0,45 L / 100) 0,5\mu\text{m}$
Přípustná okolní teplota		16°C - 26°C
Kolísání teploty		max. 2,0 K/h, 5,0 K/24h
		max. 1,0 K/m
Měřicí systém	rozlišení	0,5 μm
Vedení		Vzduchová ložiska na všech osách
Aretace os		Vzduchová rychloaretace na všech osách
Měřicí stůl	materiál	granit
	rozměry	638 x 860 mm
Požadavky na vzduch	spotřeba/tlak vzduchu	12,5l/min., 0,40MPa
	dodávaný vzduch	25 l/min., 0,5 - 0,9 MPa
Rozměry	šířka	1082 mm
	délka	1078 mm
	výška	2285 mm
Hmotnost	včetně podstavce	495 kg

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 27
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

3 EXPERIMENT

U námi zvoleného postupu musí být zaručena dostatečná přesnost a reprodukovatelnost výsledků. Podmínky měření by měly co nejvíce odpovídat skutečným praktickým úkolům (pracovní rychlosti, konfigurace nástroj-obrobek apod.). Dalším důležitým hlediskem jsou nároky na měření, které určují důležitou hospodárnost.

Přímým měřením geometrické přesnosti obráběcích strojů se zabývá první a druhá část normy ISO 230 s obecným názvem **Zásady zkoušek obráběcích strojů**. V normě jsou uvedeny základní geometrické a metrologické definice, metody měření a způsoby určení tolerancí v pracovním prostoru obráběcího stroje.

V této normě jsou také uvedeny obecné zásady geometrických zkoušek, jež se mají provádět na stroji v klidu, nebo za chodu na prázdno, aby byly vyloučeny jiné zdroje nepřesností, jako jsou u např. vibrace či deformace. Velmi důležitý je teplotní stav stroje před zkouškou. Podmínky měření by se měly co nejvíce blížit normálním, a tedy pracovním. Je tudíž nutné stroj u uvést do provozního, teplotně ustáleného stavu.

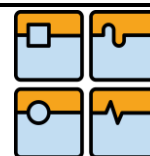
Data z měření musí mít vypovídací hodnotu. Je nutné stanovit, popř. kvantifikovat, podmínky, jež měly na měření vliv. Mezi tyto údaje patří:

- čas a časový průběh měření,
- největší hodnota teplotního gradientu prostředí po dobu dvanácti hodin před měřením a po dobu měření,
- teplota v místě obrobku,
- způsob sestavení měření,
- provozní stav před měřením (okrajové podmínky, např. otáčky vřetena, rychlosti posuvu a doba zahřívání na provozní teplotu stroje),
- případné zatížení hmotností,
- postup a přesnost měření,
- schéma uspořádání měření s vyznačenými polohami vřetena, všech os včetně měřené a polohou měřeného bodu,
- popis průběhu a údaje o najíždění do poloh (doba, rychlost, nastavení saní, vzdálenost).

Během měření by se tyto veličiny neměly příliš měnit a je nutné je proto kontrolovat. Při srovnávání výsledků z více měření musí být rozdílné podmínky zohledněny.

Zvláště standardní nejistota a tedy i opakovatelnost nastavení jsou obzvláště citlivé na změny teploty.

Nejprve bylo v rámci kalibrace provedeno měření pomocí Ballbaru a následovalo měření Laser Tracerem. Na základě výsledků kalibrace jsem sestavil pomocí softwaru Trac-cal kompenzační soubor a ten jsem nahrál přímo do řídicího systému vertikální frézky. Poté jsem v řídicím systému SIEMENS aktivoval opci VCS (Volumetric compensation system). Následovalo verifikační měření opět v pořadí nejprve Ballbar a poté Laser tracer.



3.1 DEMONSTRÁTOR

Měření bylo provedeno na stroji MCV 754 QUICK (Obr. 3.1) od společnosti KOVOSVIT MAS. Jedná se o tříosé vertikální obráběcí centrum, které na všech osách používá lineární valivá vedení. Základní parametry stroje jsou uvedeny v tabulce (Tab. 3.1) [6].



Obr. 3.1 Vertikální frézka MCV 754 QUICK [6]



Obr. 3.2 Výrobní štítek měřeného stroje MCV 754 QUICK

Tab. 3.1 Technické parametry vertikální frézky MCV 754 QUICK [6]

Rozsah osy X	754 mm
Rozsah osy Y	500 mm
Rozsah osy Z	550 mm
Max. otáčky vřetena	10 000min ⁻¹
Max. zatížení stolu	400 kg
Kuželová dutina vřetene	ISO 40
Výkon motoru vřetena SIEMENS (S1/S6)	9 / 13 kW
Řídicí systém	SIEMENS Sinumerik 810D



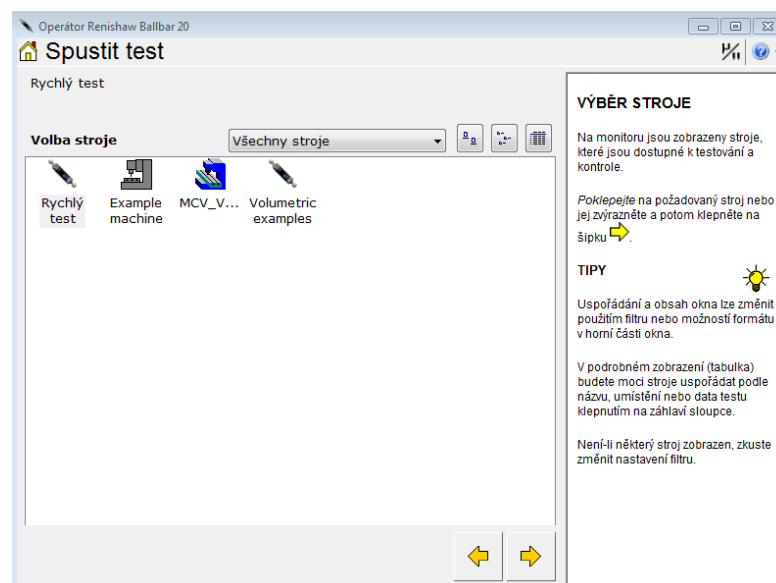
3.2 SOFTWARE RENISHAW BALLBAR 20

Systém Ballbar 20 umožňuje nastavení a spuštění testů Ballbar, buď jako „jeden z“, nebo použitím uživatelsky definované šablony testu. Nasnímaná data lze zobrazit jako analytické přehledy podle různých mezinárodních norem, např. ISO 230-4, ANSI B5.54 apod., nebo ve formátu komplexní analýzy Renishaw. Software Ballbar 20, kromě grafického zobrazení, ohodnotí každou diagnostikovanou chybu podle jejího vlivu na celkovou přesnost stroje, což je zřetelně uvedeno současně s hodnotou polohové tolerance [5].

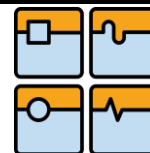


Obr. 3.3 Renishaw Ballbar 20, úvodní nabídka

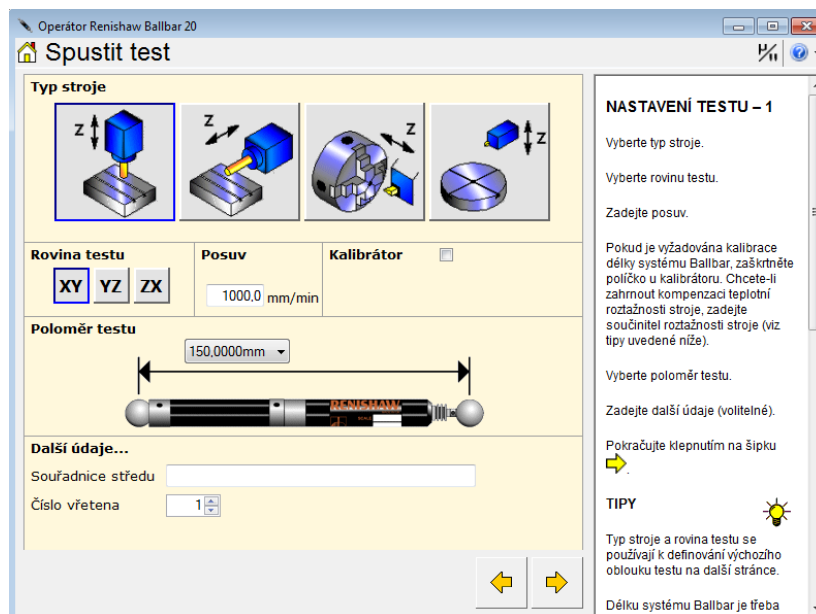
Po výběru možnosti spuštění testu je nutné ve výběru Volba stroje zvolit měřený stroj (Obr. 3.3).



Obr. 3.4 Renishaw Ballbar 20, volba stroje

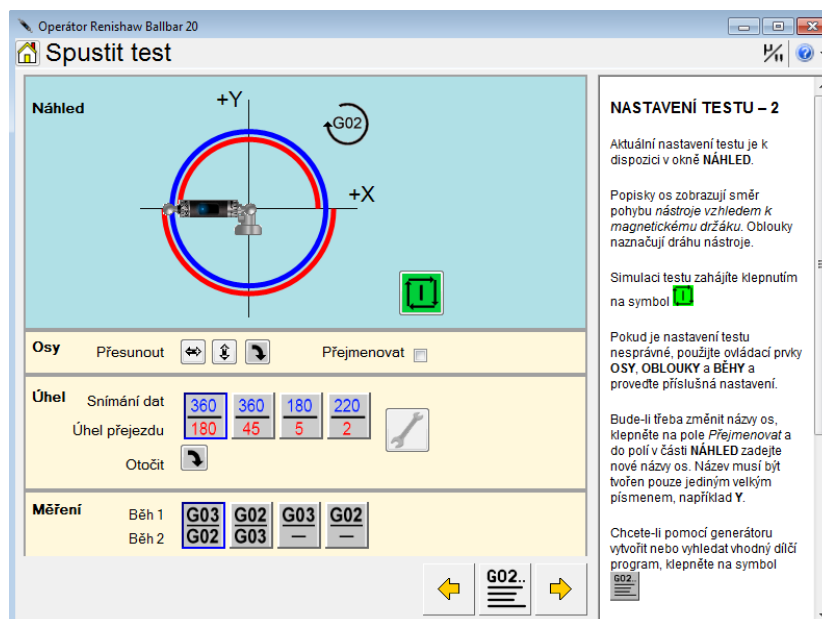


Výběrem rychlého testu je možné přesně nastavit jaký stroj budeme měřit, rovinu ve které bude měření probíhat, rychlost posuvu, délku ballbaru s nástavcem a souřadnici středu (Obr. 3.5).



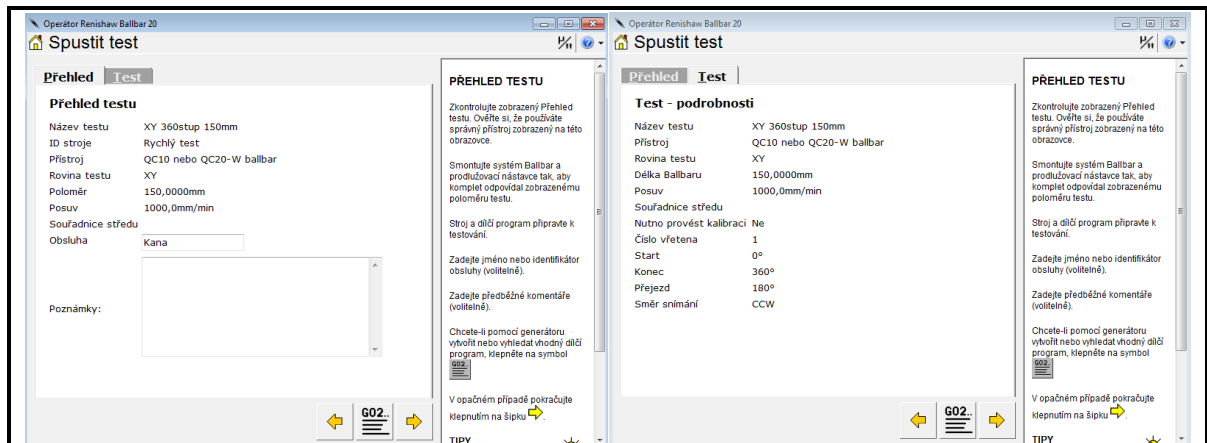
Obr. 3.5 Renishaw Ballbar 20, nastavení rychlého testu

Kliknutím na šipku směrem doprava se dostaneme k dalšímu nastavení. Zde je možné zvolit orientaci os souřadného systému, úhly snímání a přejezdů. Také je možno nastavit způsob dopředného a zpětného běhu měření (Obr. 3.6).



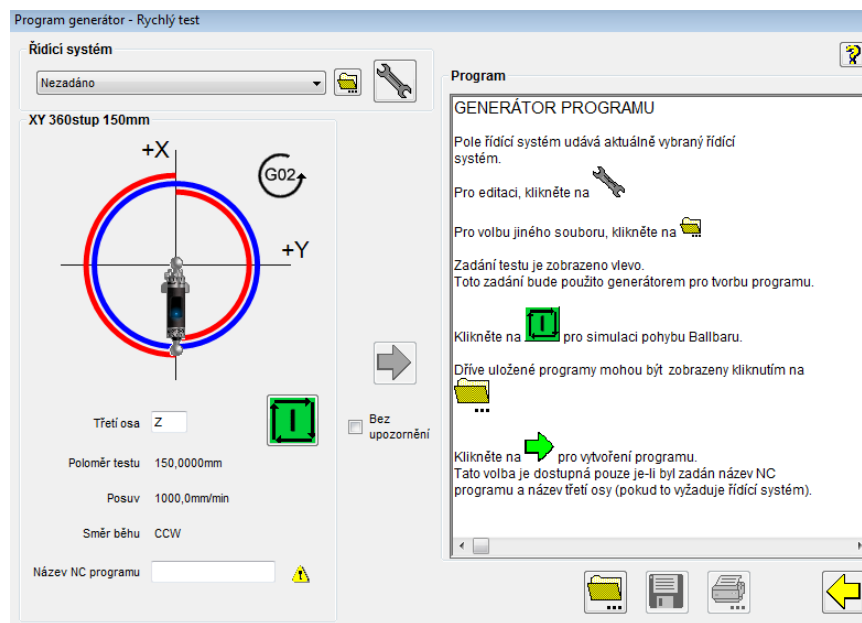
Obr. 3.6 Renishaw Ballbar 20, nastavení rychlého testu

Přehled testu slouží ke kontrole zadaných parametrů testu (Obr. 3.7). Zde je možné všechny podrobnosti ještě jednou zkontrolovat a doplnit poznámku k testu pro jeho odlišení a snadnější identifikaci.



Obr. 3.7 Renishaw Ballbar 20, přehled testu

Kliknutím na položku G02 se zobrazí nabídka pro vytvoření NC kódu, který je potřeba např. pomocí flash disku nahrát přímo do řídicího systému stroje (Obr. 3.8).

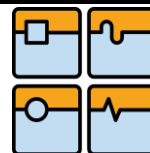


Obr. 3.8 Renishaw Ballbar 20, generátor programu

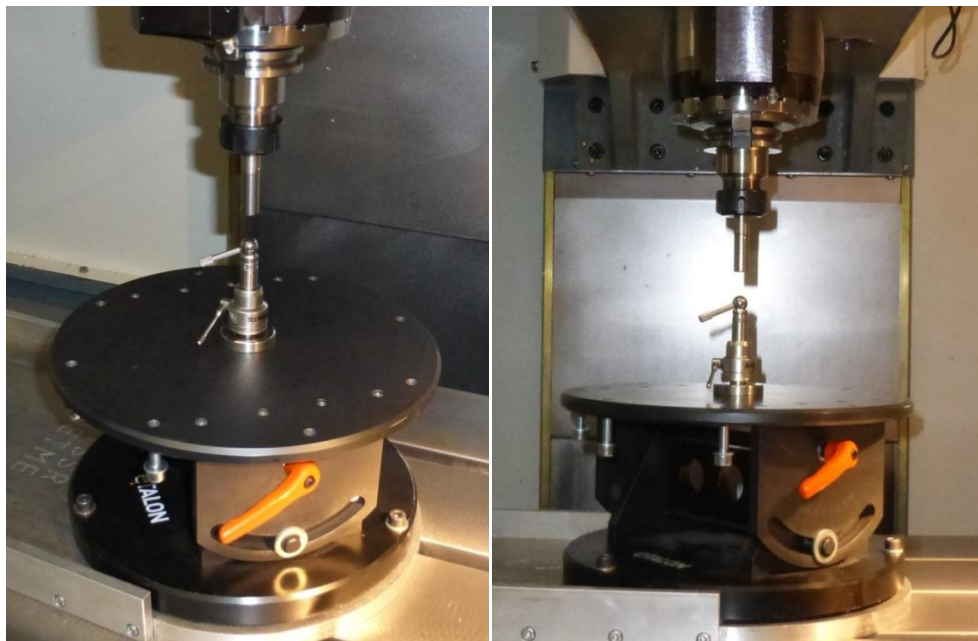
Následujícím bodem postupu je propojení ballbaru se softwarem a následná kalibrace délky ballbaru pomocí příslušenství dodávaného spolu s ballbarem. Jedná se o desku s teplotně stálého materiálu, na kterou jsou na přesně specifikovaná místa umístěny koncové kulové plochy ballbaru (Obr. 3.9).



Obr. 3.9 Kalibrátor systému ballbar



Před spuštěním samotného testu je nutné provést vycentrování osy vřetene a nastavitelného magnetického držáku do polohy, kterou jsme zadali jako souřadnici středu do softwaru ballbar (Obr. 3.10). Přesnost ustavení držáku vůči vřetenu ovlivňuje celkovou přesnost měření.



Obr. 3.10 Ustavení magnetického držáku

Po ustavení a vycentrování držáku je možné spustit samotný test (Obr. 3.11). Měření probíhá ve 3 rovinách. Jedná se o roviny XY, YZ a XZ. Je nutné, aby každé jednotlivé měření bylo provedeno v dopředném a zpětném směru pohybu. Např. v rovině XY to znamená měření proti směru hodinových ručiček a bezprostředně poté zpětně ve směru hodinových ručiček.



Obr. 3.11 Měření pomocí ballbaru

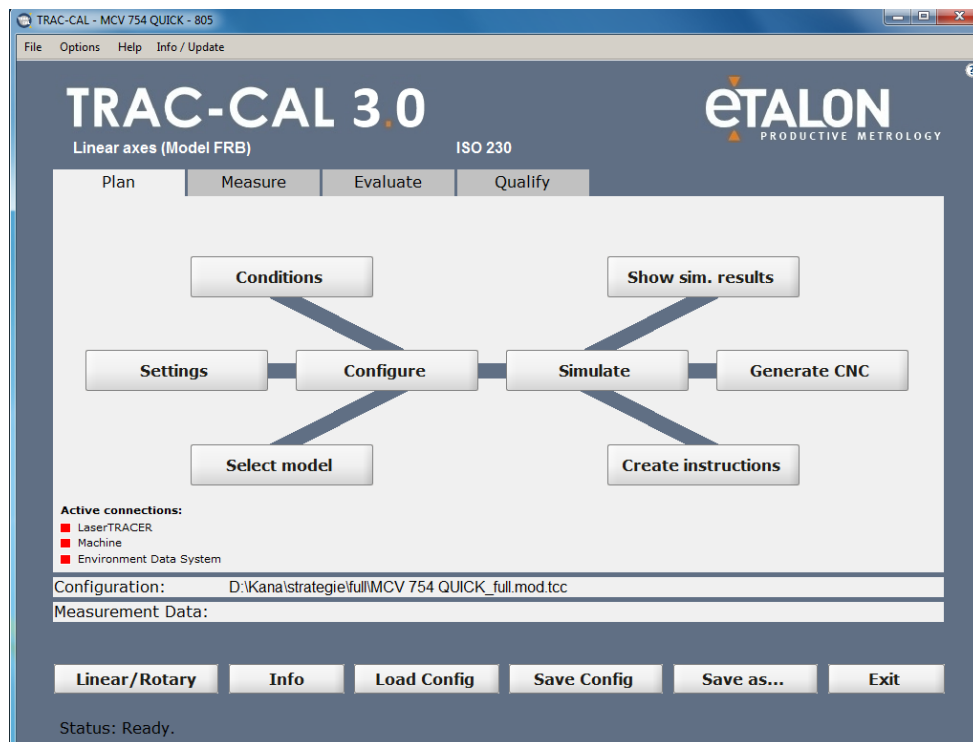


3.3 SOFTWARE TRAC-CAL

V případě softwaru Trac-cal se jedná o revoluční metodu pro prostorové kalibrace a ověřování měřidel obráběcích strojů všech velikostí. Metoda je založena na principu interferometrického měření prostorových posunů. Doba potřebná pro plné zmapování chyb se pohybuje v řádech hodin, záleží na velikosti měřeného stroje .

Jednotlivé funkce jsou v softwaru Trac-cal rozděleny do čtyř záložek(Obr.3.12):

- Plan – konfigurace strategie měření a simulace výsledků,
- Measure– informace týkající se probíhajícího měření,
- Evaluate – přehled naměřených hodnot,
- Qualification – vyhodnocení dle normy.

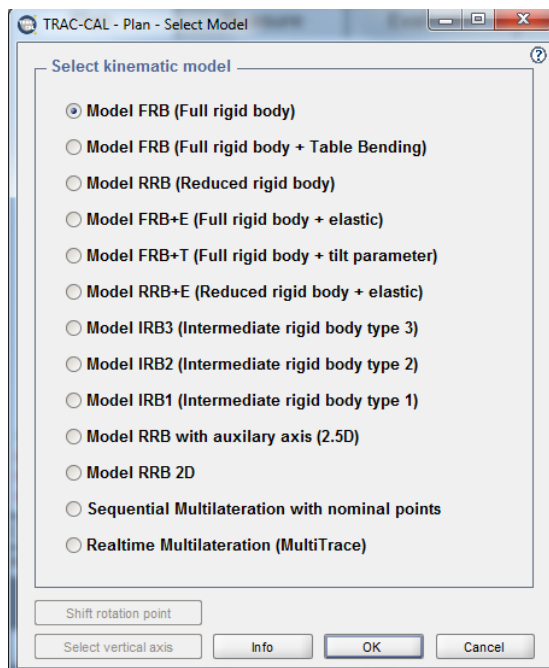
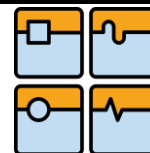


Obr. 3.12 Trac-Cal, úvodní nabídka a zároveň záložka Plan

3.3.1 PLAN

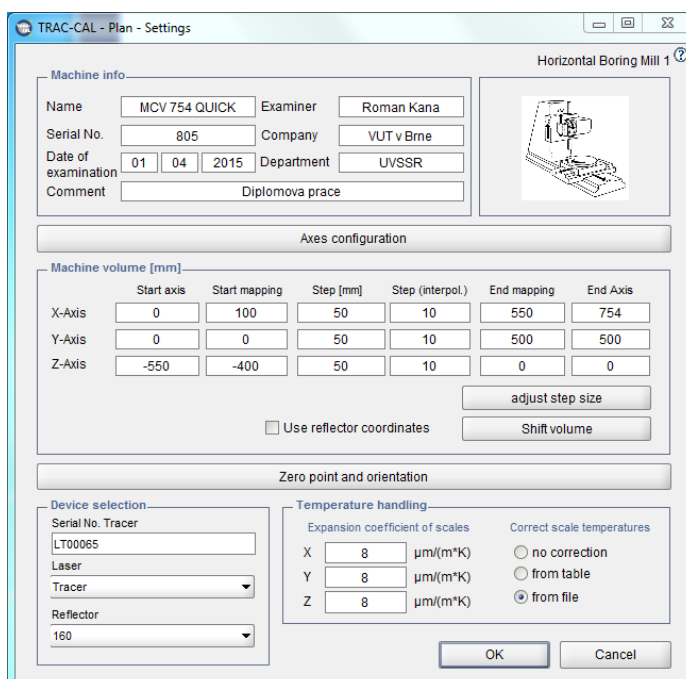
Záložka Plan slouží k přípravě a vytváření cest pro měření a simulaci výsledků. Nejprve by měl být zvolen model stroje, na kterém bude měření probíhat. Zde je na výběr z deseti možných typů. Pro svá měření jsem používal model FRB (plné těleso) a RRB (redukované pevné tělo) [9].

- Model FRB –v případě plného tělesa je možno vyhodnotit 21 chybových parametrů. K určení rotace osy Z je, v našem případě, nutné provést nejméně 3 měřeními s rozdílným offsetem reflektoru.
- Model RRB – u redukovaného pevného tělesa vyhodnocujeme 17 chybových parametrů. Reflektor je namontovaný na středu bodu nástroje. Rotace kolem bodu středu nástroje nejsou stanoveny.



Obr. 3.13 Trac-Cal výběr modelu

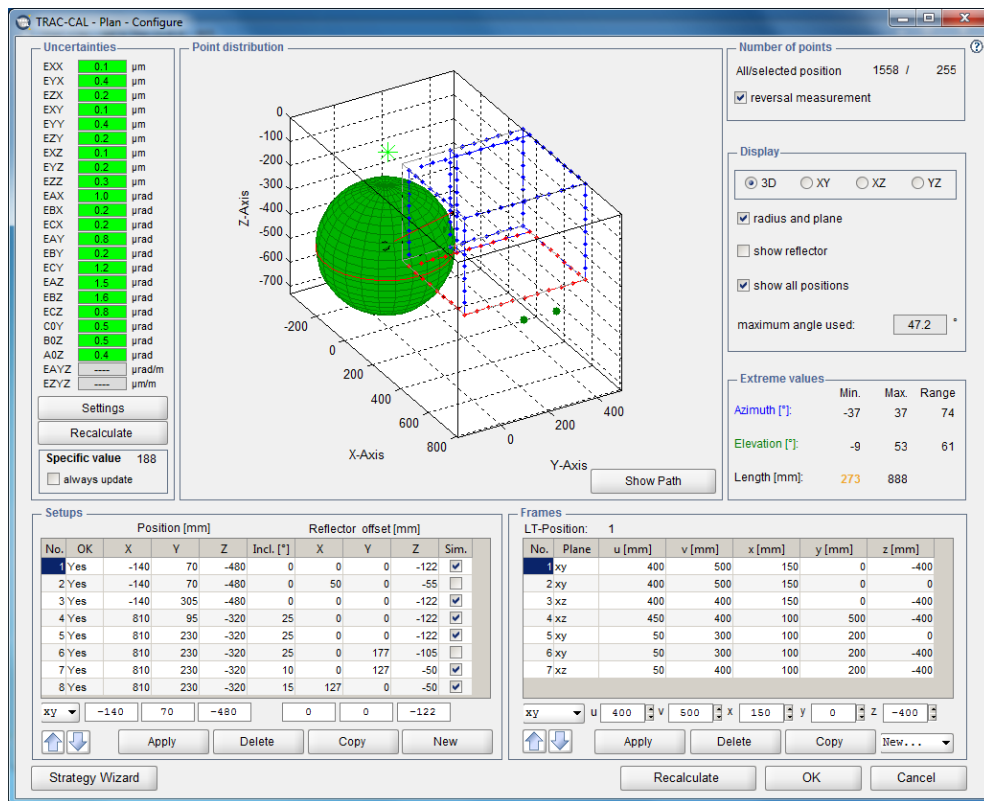
Po zvolení modelu přichází na řadu odkaz nastavení (Obr. 3.14). Zde se nastavuje měřicí rozsah stroje, dále počáteční a koncový rozsah, ve kterém bude probíhat mapování výsledků a také krok, který definuje vzdálenost mezi jednotlivými měřícími body. Dále je nutno definovat měřící zařízení, v tomto případě Laser Tracer a používaný reflektor. Důležitým krokem je zvolení správné orientace os v souřadném systému a jejich kinematické pořadí. Jedním z posledních kroků v této záložce je nastavení teplotního koeficientu roztažnosti [9].



Obr. 3.14 Trac-Cal nastavení



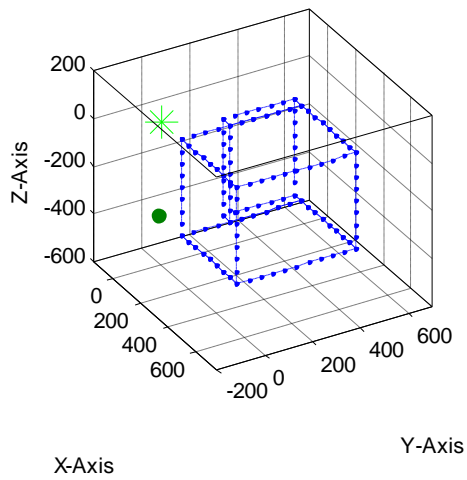
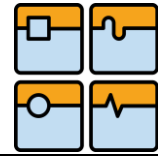
Základní částí přípravy je záložka konfigurace, ve které se nastavuje strategie měření, a která významně ovlivňuje nejistotu výsledků. Zde se definují polohy, ve kterých bude umístěn Laser Tracer. Pro jednotlivé polohy Laser Traceru je nutné vytvořit trasu měření, ve které budou zaznamenávány body. V případě modelu FRB bylo definováno 6 různých pozic pro měřicí zařízení a ve čtyřech těchto polohách byl nadefinován podstavec. U modelu FRB je důležité nadefinovat také polohu offsetu, což bylo provedeno pro pátou a šestou pozici. Všechny zadané hodnoty musí být v milimetrech. Všechny tyto pozice jsou přesně popsány v tabulce (Tab. 3.2). Po nastavení všech pozic a jednotlivých tras pro tyto pozice musí být proveden přepočít, který vyhodnotí námi zvolenou strategii a určí možné nejistoty. Ty jsou zobrazeny v levém horním rohu pro jednotlivé úchytky (Obr. 3.15). Jestliže jsou nejistoty v námi zvolené toleranci, všech 21 úchytek je na zeleném pozadí a zvolená strategie je vhodná. Jestliže je strategie navržena špatně, jsou některé parametry na červeném pozadí a je možné si vybrat ze dvou možností. První z nich je upravit strategii, např. změnou trasy nebo polohou offsetu a nebo druhá, spokojit se s možností větší odchylky a strategii ponechat [9].



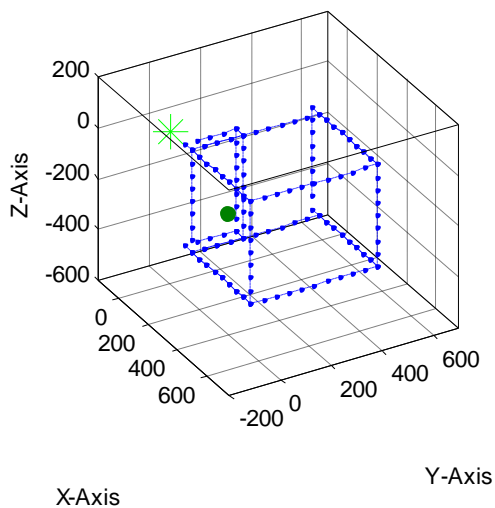
Obr. 3.15 Trac-Cal plánování strategie měření

Tab. 3.2 Pozice Laser Traceru

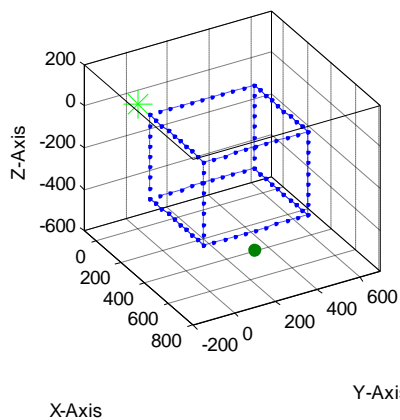
Nr.	LaserTRACER Position			Reflector offsets		
	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
1	-140	70	-480	0	0	-122
2	-140	305	-480	0	0	-122
3	810	95	-320	0	0	-122
4	810	230	-320	0	0	-122
5	810	230	-320	0	127	-50
6	810	230	-320	127	0	-50



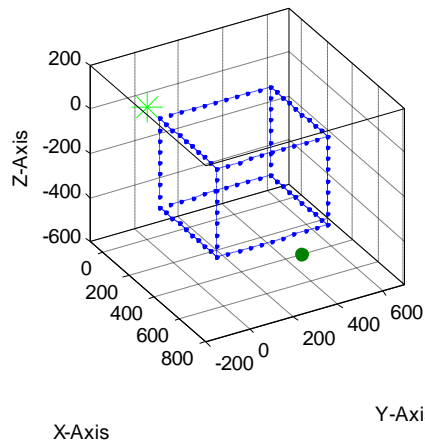
Obr. 3.16 Měřící pozice 1, pozice v Trac-Calu a skutečná pozice na stroji



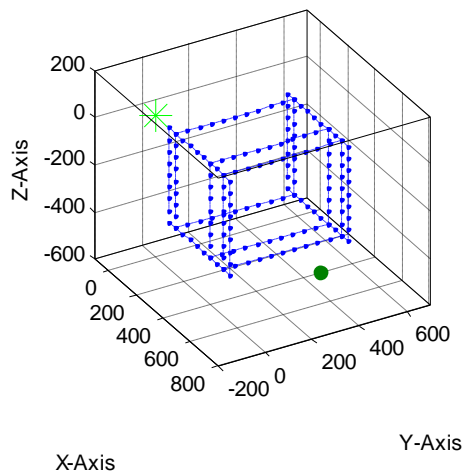
Obr. 3.17 Měřící pozice 2, pozice v Trac-Calu a skutečná pozice na stroji



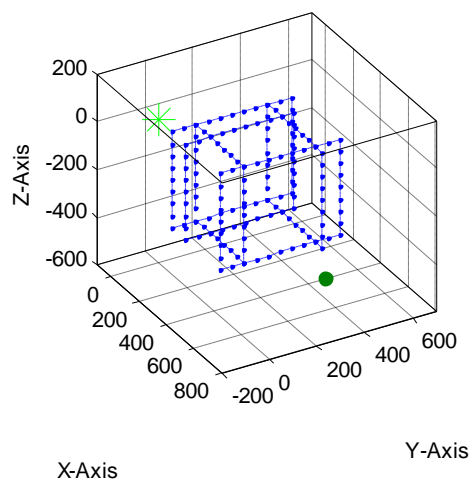
Obr. 3.18 Měřící pozice 3, pozice v Trac-Calu a skutečná pozice na stroji



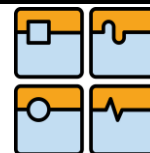
Obr. 3.19 Měřící pozice 4, pozice v Trac-Calu a skutečná pozice na stroji



Obr. 3.20 Měřící pozice 5, pozice v Trac-Calu a skutečná pozice na stroji

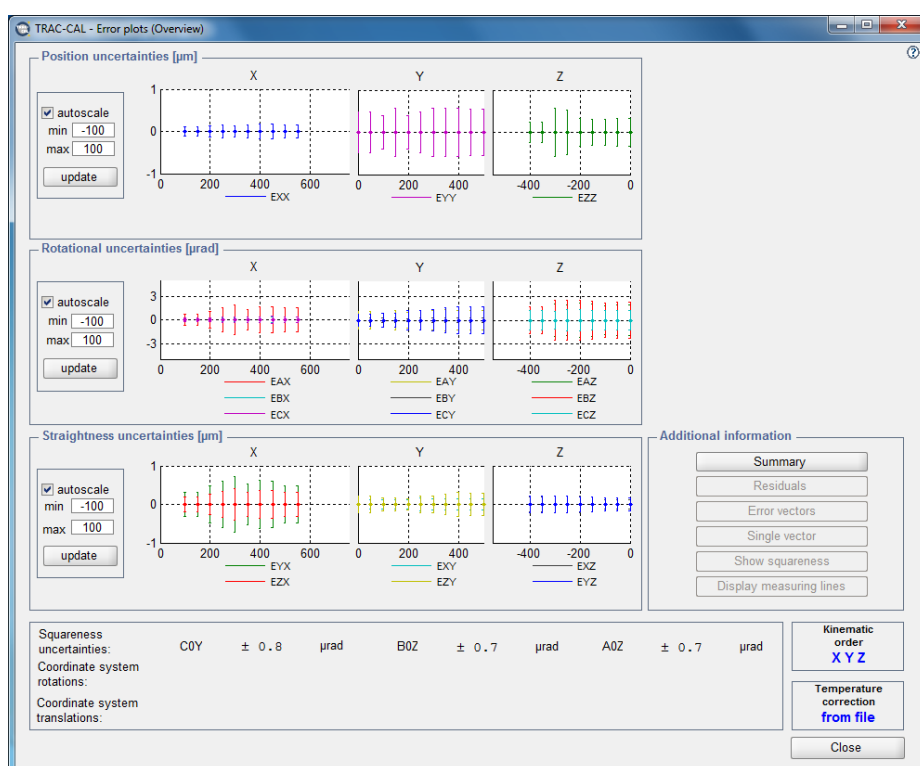


Obr. 3.21 Měřící pozice 6, pozice v Trac-Calu a skutečná pozice na stroji



Na obrázcích (Obr. 3.16 až Obr. 3.21) jsou jednotlivé měřící pozice. V levé části vždy zobrazení pozice v softwaru Trac-Cal, vpravo potom skutečná pozice v pracovním prostoru stroje. U pozic 5 a 6 (Obr. 3.20 a Obr.3.21) je dobře patrný offset odrazového zrcadla vůči ose vřetene.

Funkce simulace provede vyhodnocení nejistot pomocí numerické metody Monte Carlo. Tato funkce nejen vyhodnotí, zda je reálné následné vyhodnocení při měření, ale také vypíše s jakou nejistotou mohou být parametry stanoveny. Je tedy možné ještě před samotným měřením optimalizovat konfiguraci měření a vzít v úvahu kvalitu výsledků. Při spuštění simulace je možné vybrat počet chodů simulace touto metodou. Po provedení simulace jsou vypsány nejistoty v příslušném schématu a jestliže program simulaci nedovolí, znamená to, že nejsou splněny dané podmínky pro kinematický model [9].



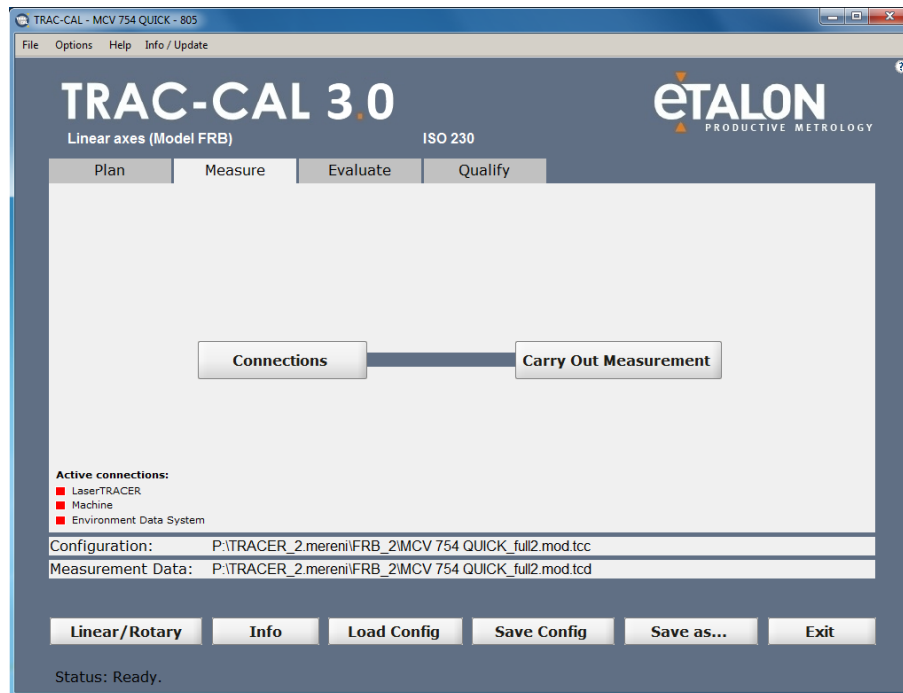
Obr. 3.22 Trac-Cal simulace

Tlačítkem vytvořit instrukce se vytvoří dokument aplikace Word, ve kterém je vypsána strategie měření. Najdeme zde např. název stroje, na kterém probíhá měření, jeho pracovní rozsah, nejistoty, které mohou vzniknout při měření parametrů a jako poslední rozpis všech pozic, do kterých jsme umístili měřící přístroj, popřípadě umístění offsetu [9].

Poslední záložkou v tomto modulu je generovat CNC. Jak již název vypovídá, po spuštění se provede vytvoření CNC kódu, ve kterém je přesně nakonfigurovaný pohyb stroje. Tento kód je načten obráběcím strojem a je možno přejít k dalšímu kroku [9].

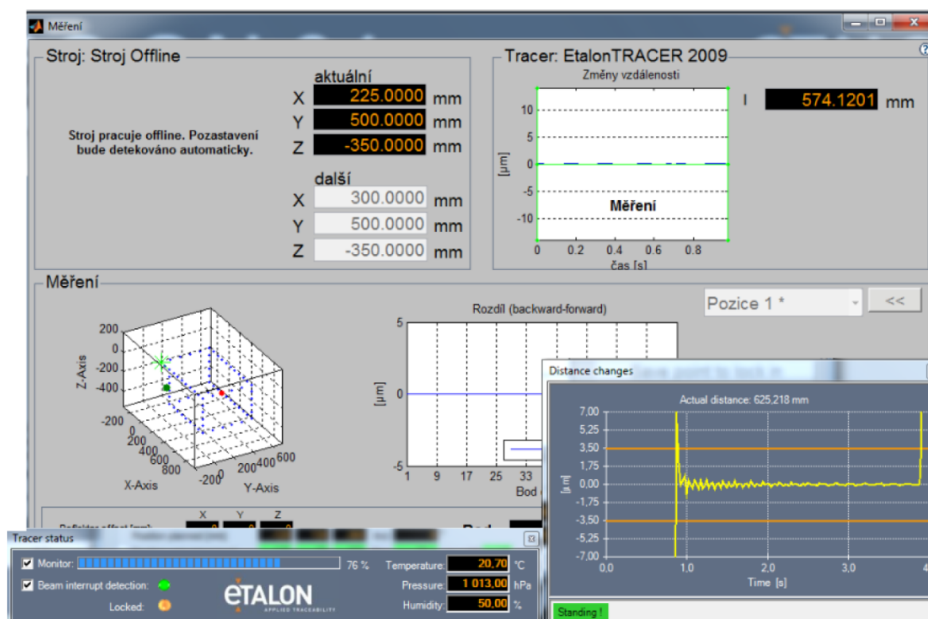


3.3.2 MEASURE

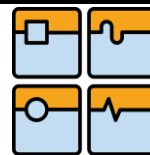


Obr. 3.23 Trac-Cal záložka Measure

Zde jsou pouze dvě možné funkce (Obr. 3.23). První je analýza spojení, při které se vytváří spojení mezi obráběcím strojem, měřícím strojem a snímačem teplot. Po úspěšném spojení přichází na řadu druhá funkce, která aktivuje samotné měření. V této části je možné kontrolovat a nastavovat námi definované pozice, ve kterých v danou chvíli chceme měřit. Po celou dobu měření je možné kontrolovat aktuální pozici Laser Traceru, odchylku v daném místě nebo průběh teplot v jednotlivých osách, hodnoty teploty okolního prostředí, tlaku a vlhkosti (Obr. 3.24) [9].

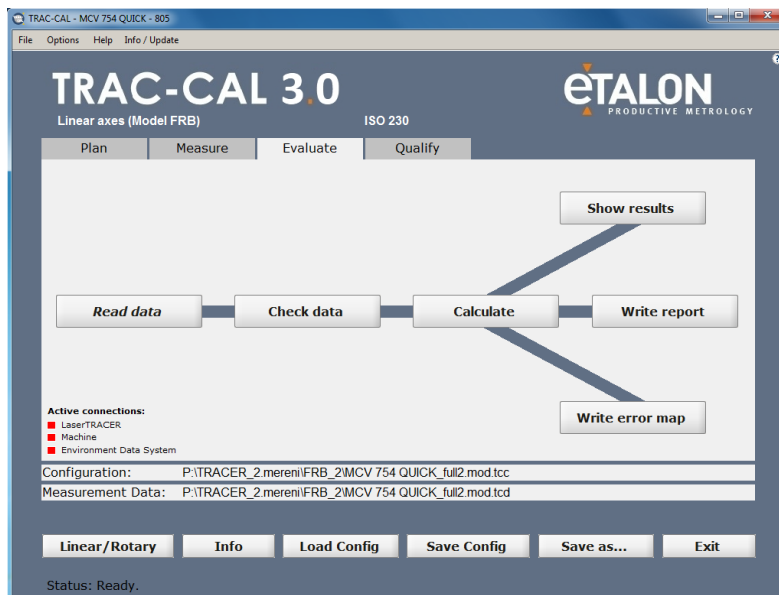


Obr. 3.24 Trac-Cal měření



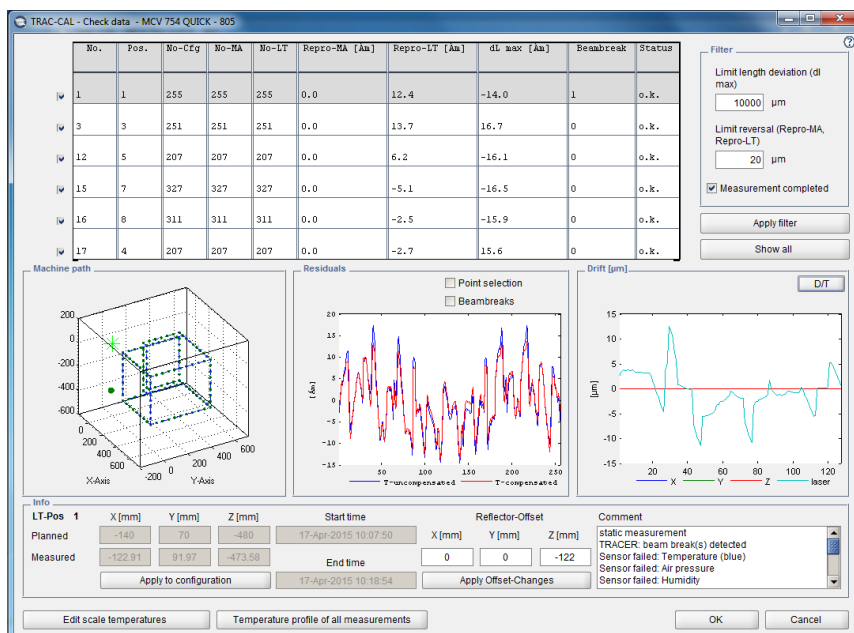
3.3.3 EVALUATE

V záložce (Obr. 3.25) je hlavní funkcí vyhodnocení a zdokumentování naměřených dat. Nejprve dochází k načtení souboru naměřených dat. Tímto pokynem se zpracují informace o všech naměřených bodech (vzdálenosti, teploty atd.) [9].

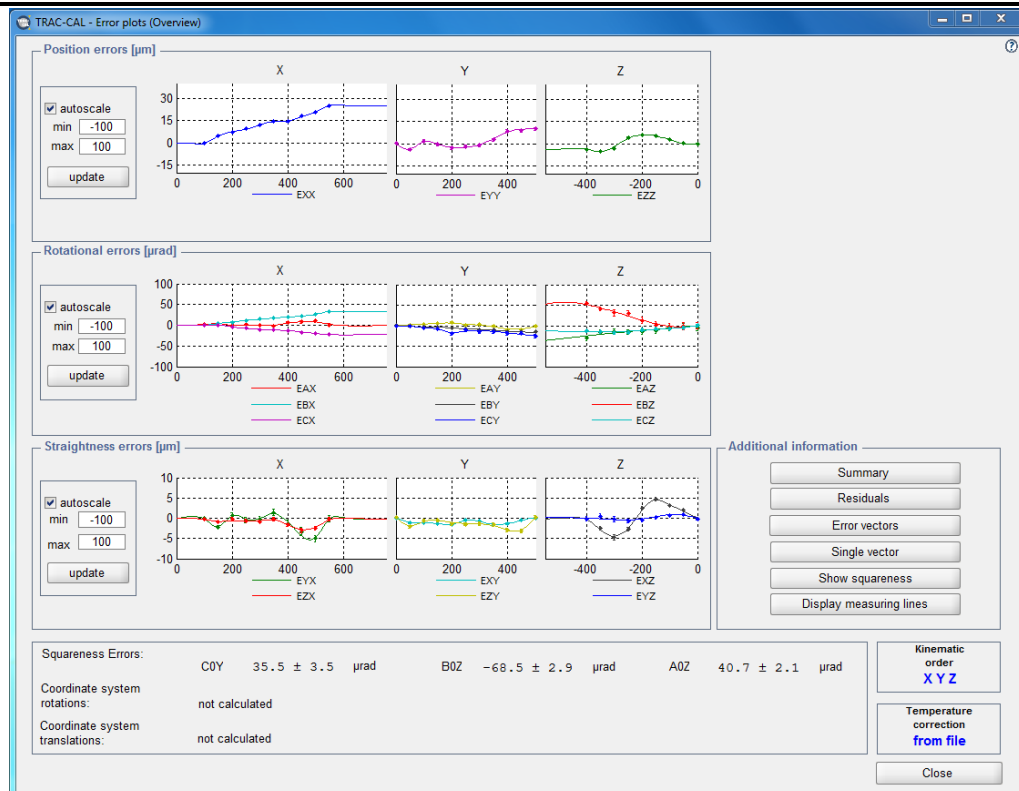


Obr. 3.25 Trac-Cal záložka Evaluate

Po jejich načtení je další funkcí prověřit data. V tabulce jsou uvedeny jednotlivé měřené pozice a pro každou z nich počet měřených bodů, rozdíly vzdáleností při pohybu traceru a hlavně stav, který posuzuje, zda měření v dané pozici může být vyhodnoceno. Dále je v tomto okně možno vidět dráhu stroje a grafy reziduí při kompenzaci teploty a bez kompenzace a graf posunu, který reprezentuje rozdíl vzdáleností pohybu vybraného bohu měření (Obr. 3.26) [9].



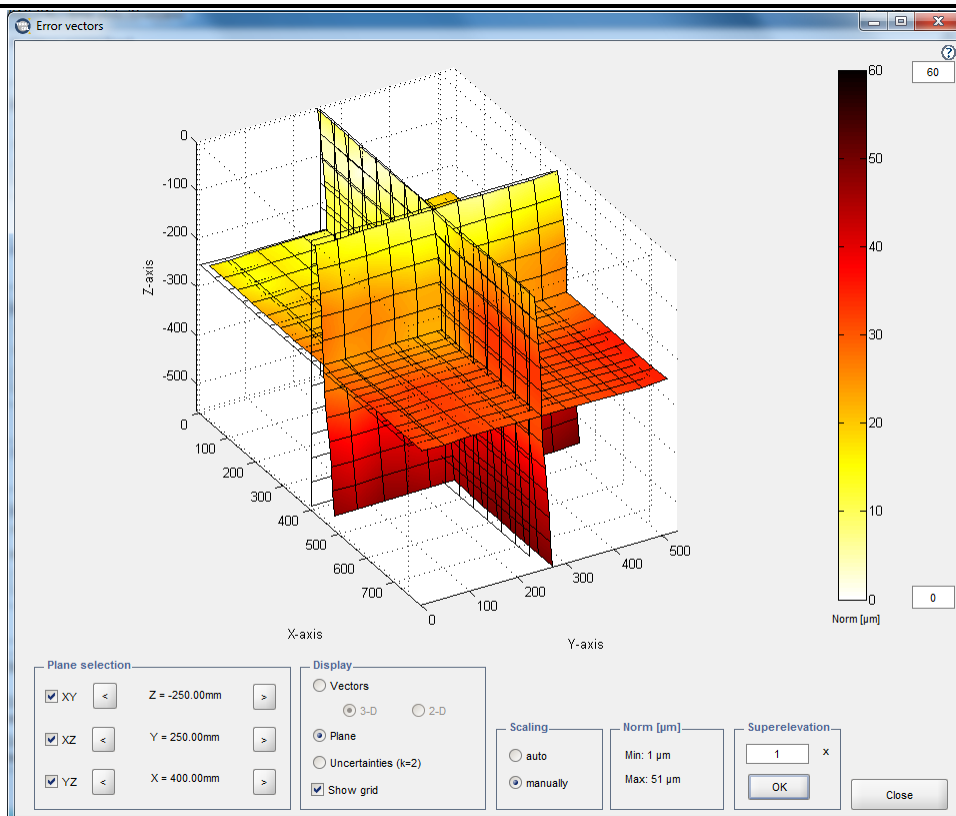
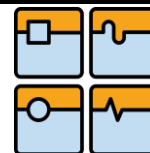
Obr. 3.26 Trac-Cal, Check data



Obr. 3.27 Trac-Cal záložka Evaluate, show results

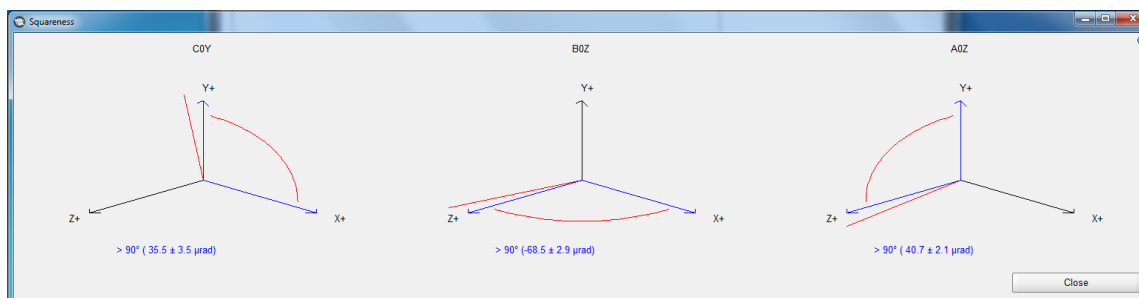
Další prvkem modulu vyhodnocení je záložka výpočet. Při spuštění dojde k vypočítání výsledků měření. Příslušné nejistoty odchylek jsou stanoveny matematickou metodou Monte Carlo. Následuje část zobrazit výsledky. Po spuštění se otevře okno (Obr. 3.27), ve kterém jsou vyobrazeny grafy měřených odchylek (chyby pozice, chyby rotace, chyby přímosti). Tyto grafy jsou součástí měřicího reportu. Odkaz souhrn zobrazuje konkrétní číselné hodnoty daných odchylek. Je také součástí měřicího reportu [9].

Další částí je mapa chybových vektorů. Pomocí ní je možné zobrazit chybové vektory v prostoru nebo v požadovaných rovinách. Pro konkrétní představivost se nabízí možnost zobrazení chybových vektorů v měřítku. Tato možnost (Obr. 3.28) reprezentuje celý prostor obráběcího stroje různou barvou zbarvení a s větší odchylkou se barva mění do tmavších odstínů až po černou [9].



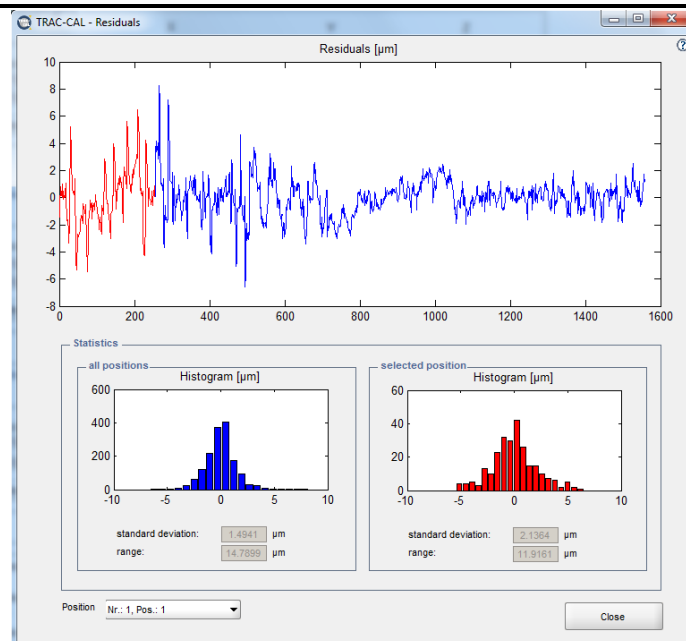
Obr. 3.28 Trac-Cal záložka Evaluate, zobrazení chyb v prostoru pomocí rovin

Jedním z dalších výpočtů jsou hodnoty kolmosti, které jsou pro větší přehlednost také vykresleny. Uživatel si snadněji představí, zda je úhel mezi dvěma osami větší nebo menší než 90° (Obr. 3.29) [9].



Obr. 3.29 Trac-Cal záložka Evaluate, zobrazení kolmostí os

Vykreslení reziduí neboli zbytků, získáme graf, který reprezentuje všechny měřící pozice a také dva histogramy. Rezidua jsou rozdíly mezi naměřenou a vypočítanou hodnotou. Jejich histogram by měl představovat Gaussovo normální rozdělení. Jestliže tomu tak je, znamená to, že měřením bylo zachyceno chování stroje a identifikována kvalita měření. V tomto případě (Obr. 3.30) histogram připomíná křivku Gaussova normálního rozdělení a měření tedy se dá považovat za správné [9].

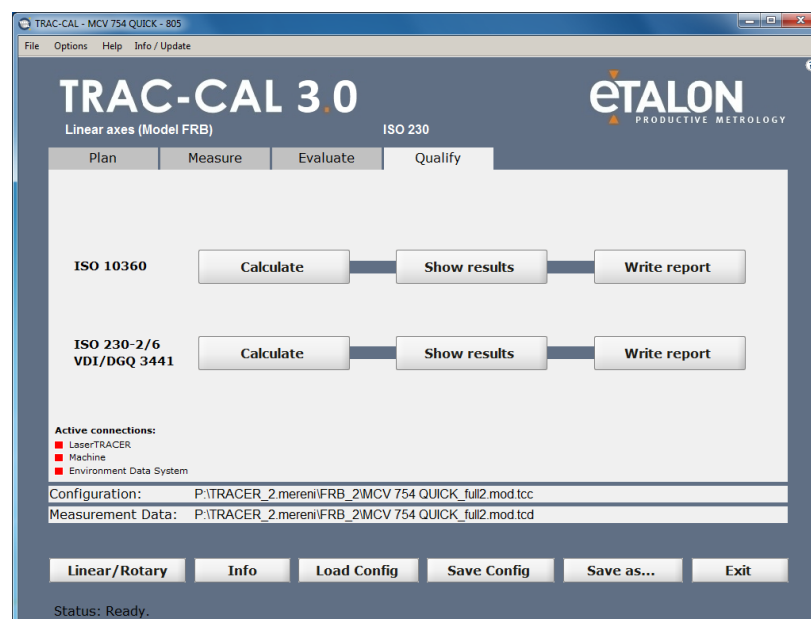


Obr. 3.30 Trac-Cal záložka Evaluate, zobrazení reziduí a histogramů

Posledními prvky modulu vyhodnocení je: záložka zapsat mapu chyb, tato funkce zpřístupní mapu chyb pod universálním formátem a zapsat report, který vypíše podrobnější krátkou zprávu se stanovenými hodnotami odchylek a graficky je znázorní [9].

3.3.4 QUALIFY

V této záložce je možné zpracovat výsledky měření do formy zprávy odpovídající normám ISO 10360, případně ISO 230-2/6, VDI/DGQ 3441 (Obr. 3.31). V této zprávě jsou znázorněny všechny parametry zadané před měřením a pomocí tabulek a grafů shrnuty výsledky měření. Díky této zprávě získáme kompletní přehled o geometrické přesnosti stroje a opakovatelnosti najetí do požadované polohy.



Obr. 3.31 Trac-Cal záložka Quali



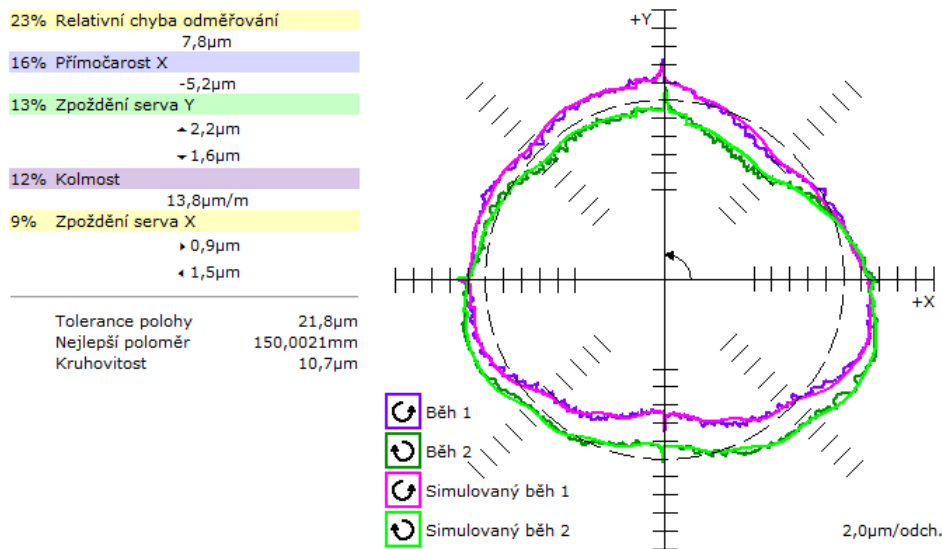
4 VYHODNOCENÍ

V této kapitole jsou zobrazeny výsledky kalibrace a verifikace při měření Ballbarem a Laser tracerem. Jejich seřazení odpovídá časovému průběhu celého prováděného experimentu. Na obrázcích z měření pomocí Ballbaru je přehledně zobrazena odchylka naměřené dráhy od ideálního kruhového tvaru.

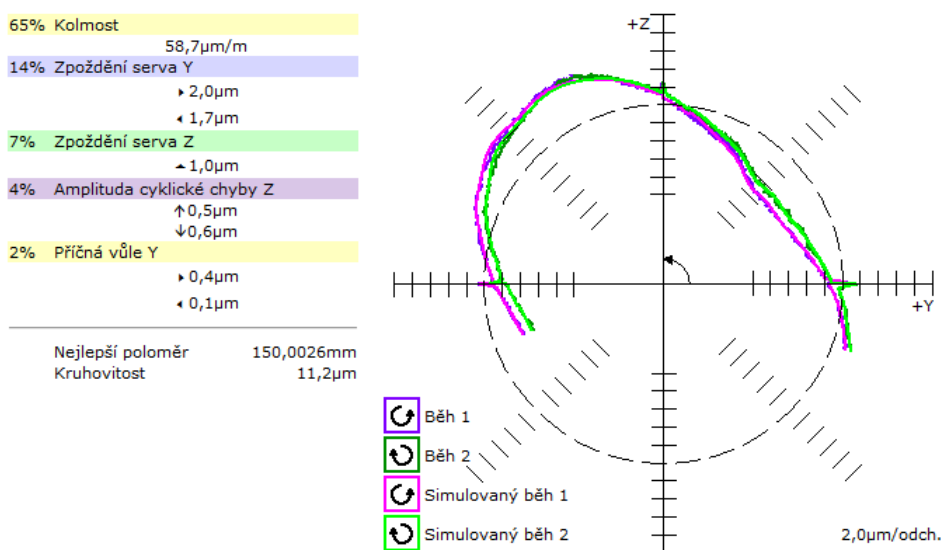
4.1 KALIBRAČNÍ MĚŘENÍ

4.1.1 BALLBAR

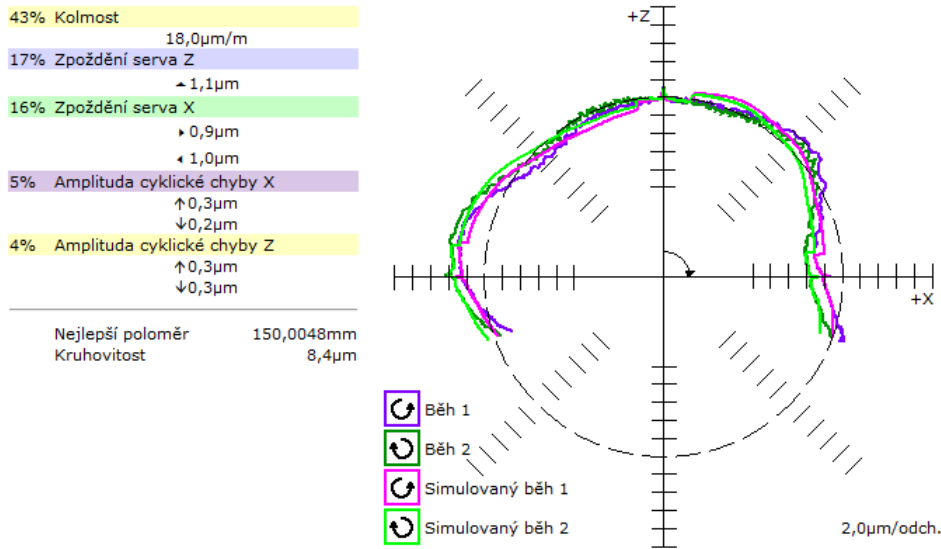
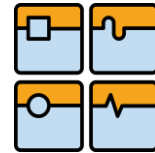
Na všech zobrazených kalibračních měřeních (Obr. 4.1 až 4.3) je dobře patrná odchylka od ideálního kruhového tvaru. Měřítka u všech tří obrázků na nastaveno na 2,0 μm na dílek osy.



Obr. 4.1 Ballbar rovina XY - kalibrace



Obr. 4.2 Ballbar rovina YZ - kalibrac



Obr. 4.3 Ballbar rovina XZ - kalibrace

4.1.2 LASER TRACER

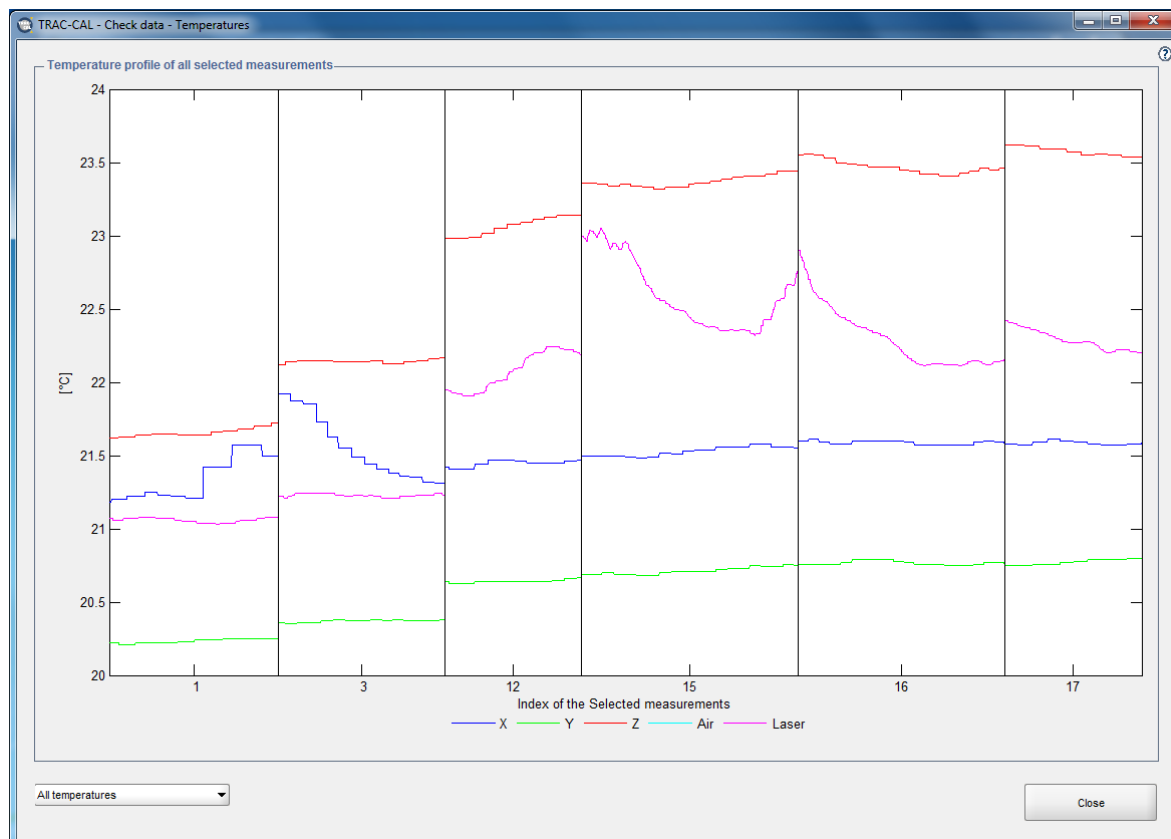
Tab. 4.1 Výsledky kalibrace - Laser tracer

Group	Parameter	Deviation (range)	Umax (95%)
Position	EXX	26,1 μ m	0,3 μ m
	EYY	13,8 μ m	0,9 μ m
	EZZ	11,3 μ m	1,0 μ m
Straightness	EYX	6,5 μ m	1,0 μ m
	EZX	2,9 μ m	0,6 μ m
	EXY	1,9 μ m	0,2 μ m
	EZY	3,8 μ m	0,5 μ m
	EXZ	9,0 μ m	0,6 μ m
	EYZ	1,3 μ m	0,6 μ m
Pitch / Yaw / Roll	EAX	11,1 μ rad	3,6 μ rad
	EBX	34,3 μ rad	0,7 μ rad
	ECX	24,2 μ rad	0,7 μ rad
	EAY	15,6 μ rad	2,2 μ rad
	EBY	15,7 μ rad	0,5 μ rad
	ECY	25,8 μ rad	4,1 μ rad
	EAZ	36,4 μ rad	6,9 μ rad
	EBZ	60,3 μ rad	8,1 μ rad
	ECZ	15,9 μ rad	3,7 μ rad
Squareness	COY	35,5 μ rad	3,5 μ rad
	BOZ	-68,5 μ rad	2,9 μ rad
	AOZ	40,7 μ rad	2,1 μ rad

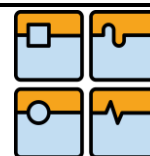


Tab. 4.2 Detaily kalibrace

Měření	Pozice	Aktuální	Nominální	Datum	Start	Konec	Trvání [min]	Teplota start [°C]	Teplota konec [°C]	Teplotní drift [°C]	Gradient [°C/hod]	Průměr [°C]
1	1	255	255	17.4.2015	10:07	10:18	11	21,1	21,1	0	0	21,10
3	3	251	251	17.4.2015	10:54	11:07	13	21,3	21,3	0	0	21,30
12	5	207	207	17.4.2015.	12:44	12:54	10	21,9	22,2	0,4	2,4	22,05
15	7	327	327	17.4.2015	13:06	13:25	19	23,0	22,7	0,3	0,9	22,85
16	8	311	311	17.4.2015	13:29	13:49	20	22,9	22,2	-0,7	-2,1	22,55
17	4	207	207	17.4.2015	13:57	14:07	10	22,5	22,2	-0,3	-1,8	22,35



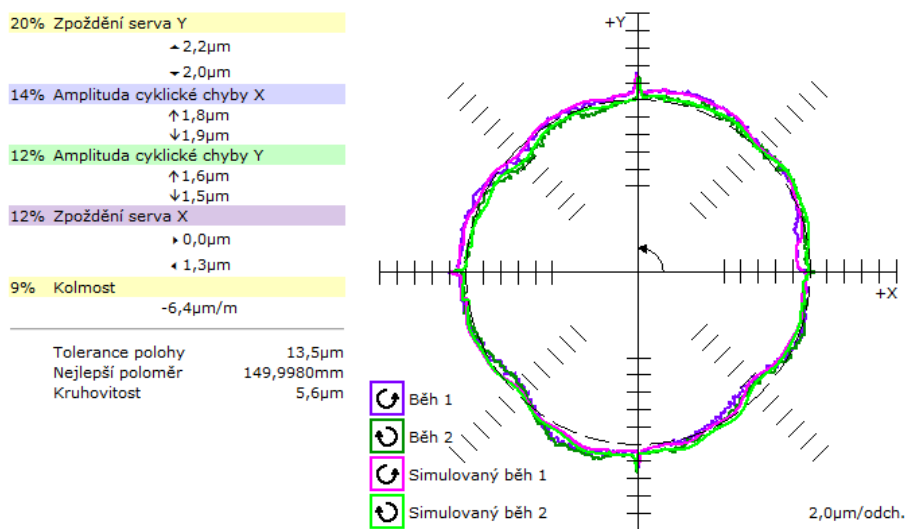
Obr. 4.4 Kalibrace, průběh teplot



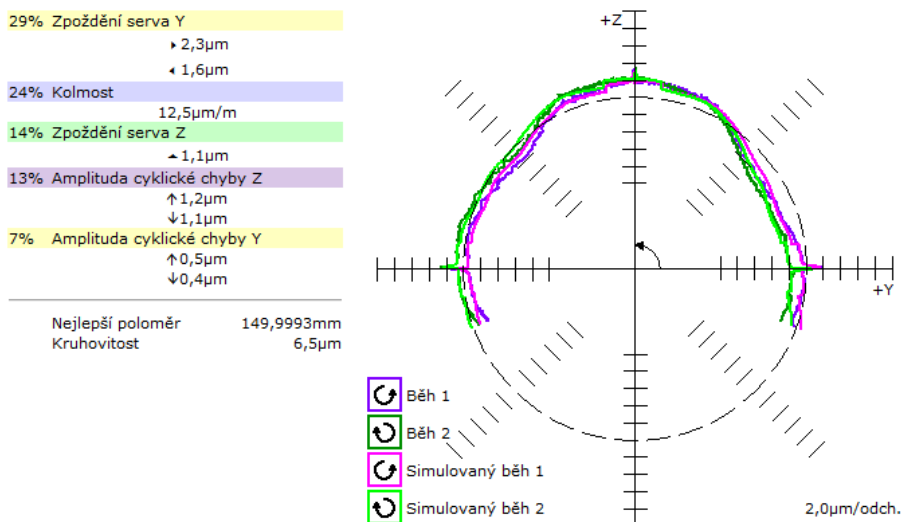
4.2 VERIFIKAČNÍ MĚŘENÍ

4.2.1 BALLBAR

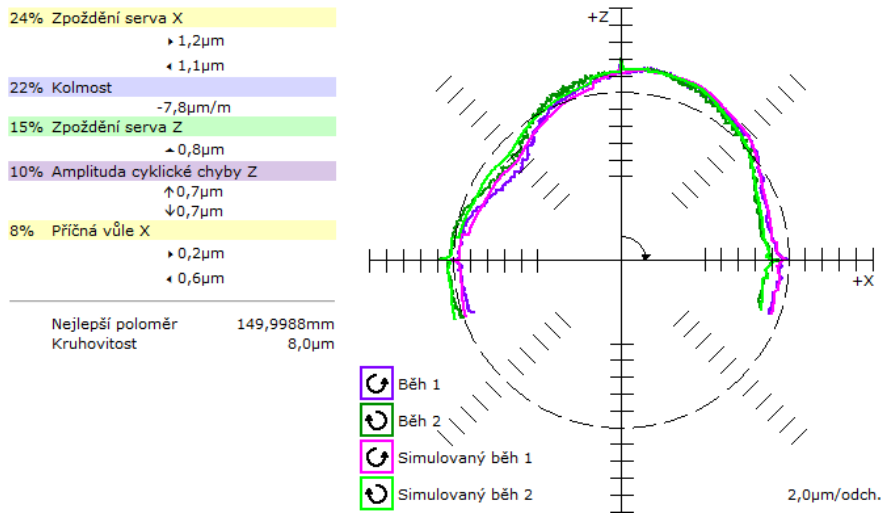
V případě výsledků verifikace je jasně patrné zlepšení oproti výsledkům kalibrace. Pokud srovnáme zobrazené dráhy měření se stejnými rovinami obrázcích (Obr. 4.1 až Obr. 4.3), je vliv volumetrické kompenzace jasně patrný na první pohled. Měřítka zobrazovaných výsledků je v případě kalibrace i verifikace totožné.



Obr. 4.5 Ballbar rovina XY - verifikace



Obr. 4.6 Ballbar rovina YZ - verifikace

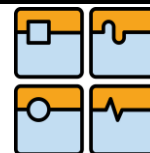


Obr. 4.7 Ballbar rovina XZ - verifikace

4.2.2 LASER TRACER

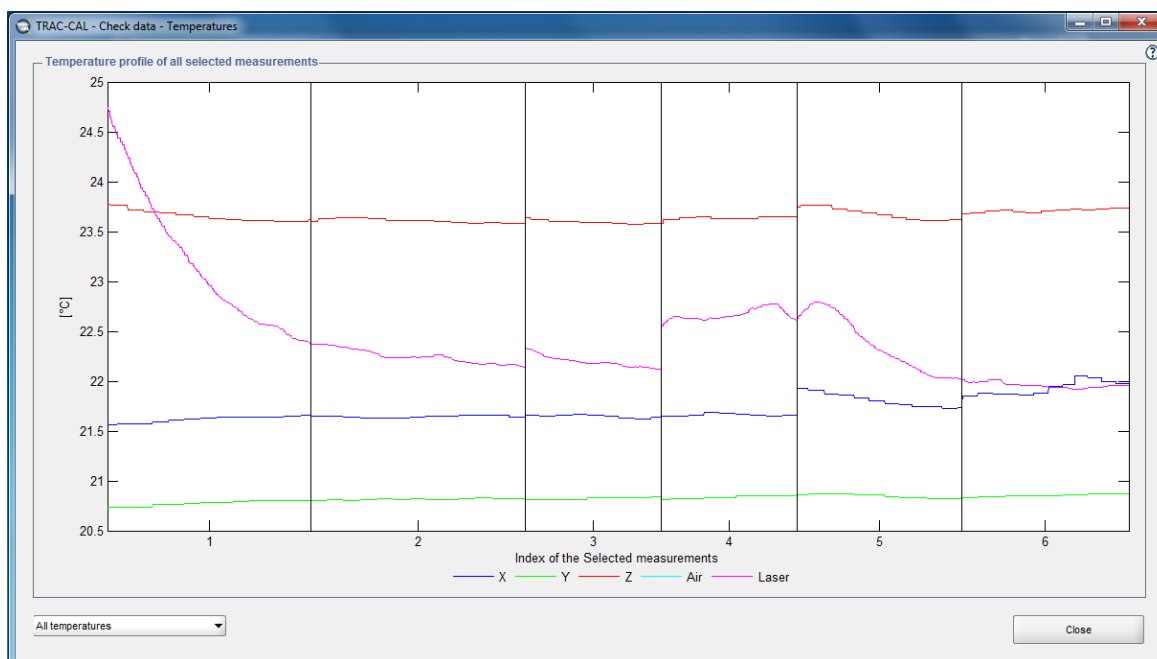
Tab. 4.3 Výsledek verifikace - Laser tracer

Group	Parameter	Deviation (range)	Umax (95%)
Position	EXX	4,4 μm	0,4 μm
	EYY	12,0 μm	1,0 μm
	EZZ	4,2 μm	0,9 μm
Straightness	EYX	7,3 μm	2,1 μm
	EZX	3,1 μm	1,1 μm
	EXY	3,5 μm	0,2 μm
	EZY	3,0 μm	0,6 μm
	EXZ	2,8 μm	0,7 μm
	EYZ	0,2 μm	0,6 μm
Pitch / Yaw / Roll	EAX	21.4 μrad	6,7 μrad
	EBX	4.1 μrad	0,9 μrad
	ECX	10.1 μrad	1,1 μrad
	EAY	15.5 μrad	2,3 μrad
	EBY	5.1 μrad	0,4 μrad
	ECY	27,0 μrad	3,6 μrad
	EAZ	39,4 μrad	6,2 μrad
	EBZ	87,1 μrad	10,5 μrad
Squareness	COY	-15,3 μrad	2,4 μrad
	BOZ	-5,0 μrad	3,6 μrad
	AOZ	-6,5 μrad	1,3 μrad



Tab. 4.4 Detaily verifikace

Měření	Pozice	Aktuální	Nominální	Datum	Start	Konec	Trvání [min]	Teplota start [°C]	Teplota konec [°C]	Teplotní drift [°C]	Gradient [°C/hod]	Průměr [°C]
1	8	311	311	17.4.2015	14:47	15:00	13	24,8	22,4	-2,4	-11,1	23,60
2	7	327	327	17.4.2015	15:02	15:15	13	22,4	22,2	-0,1	-0,5	22,30
3	5	207	207	17.4.2015	15:20	15:29	9	22,4	22,1	-0,3	-2,0	22,25
4	4	207	207	17.4.2015	15:32	15:41	9	22,6	22,7	0,1	0,7	22,65
5	3	251	251	17.4.2015	15:51	16:02	11	22,6	22,0	-0,6	-3,3	22,30
6	1	255	255	17.4.2015	16:07	16:19	12	22,0	21,9	-0,1	0,5	21,95



Obr. 4.8 Verifikace, průběh teplot



4.3 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ KALIBRACE A VERIFIKACE

4.3.1 BALLBAR

Tab. 4.5 Porovnání výsledků kalibrace a verifikace - Ballbar rovina XY

	X-Y (VCS 0)		X-Y (VCS 1)		zlepšení / zhoršení	
					absolutní	procentuální
Kruhovitost	10,7	μm	5,6	μm	5,1	47,7
Kolmost	13,8	μm/m	-6,4	μm/m	7,4	53,6
Přímochařost X	-5,2	μm	1,1	μm	4,1	78,8
Přímochařost Y	-1,6	μm	0,7	μm	0,9	56,3
Chyba odměřování X	27,2	μm/m	-16,0	μm/m	11,2	41,2
Chyba odměřování Y	1,4	μm/m	-10,6	μm/m	-9,2	-657,1
Tolerance polohy	21,8	μm	13,5	μm	8,3	38,1

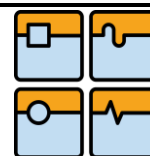
Tab. 4.6 Porovnání výsledků kalibrace a verifikace - Ballbar rovina YZ

	Y-Z (VCS 0)		Y-Z (VCS 1)		zlepšení / zhoršení	
					absolutní	procentuální
Kruhovitost	11,2	μm	6,5	μm	4,7	42,0
Kolmost	58,7	μm/m	12,5	μm/m	46,2	78,7
Přímochařost Y	-0,4	μm	-2,9	μm	-2,5	-625,0
Přímochařost Z	-1,3	μm	3,0	μm	-1,7	-130,8
Chyba odměřování Y	8,3	μm/m	-11,2	μm/m	-2,9	-34,9
Chyba odměřování Z	26,2	μm/m	1,3	μm/m	24,9	95,0
Tolerance polohy	26,6	μm	13,5	μm	13,1	49,2

Tab. 4.7 Porovnání výsledků kalibrace a verifikace - Ballbar rovina XZ

	X-Z (VCS 0)		X-Z (VCS 1)		zlepšení / zhoršení	
					absolutní	procentuální
Kruhovitost	8,4	μm	8,0	μm	0,4	4,8
Kolmost	18,0	μm/m	-7,8	μm/m	10,2	56,7
Přímochařost X	9,2	μm	4,0	μm	5,2	56,5
Přímochařost Z	1,1	μm	-2,7	μm	-1,6	-145,5
Chyba odměřování X	31,8	μm/m	1,5	μm/m	30,3	95,3
Chyba odměřování Z	32,4	μm/m	-17,5	μm/m	14,9	46,0
Tolerance polohy	31,7	μm	15,2	μm	16,5	52,1

Z porovnání výsledků měření pomocí Ballbaru (Tab. 4.5 až Tab. 4.6) je patrné zlepšení po aktivaci volumetrických kompenzací. Pouze u 1 chyby v rovině XY nastalo výrazné



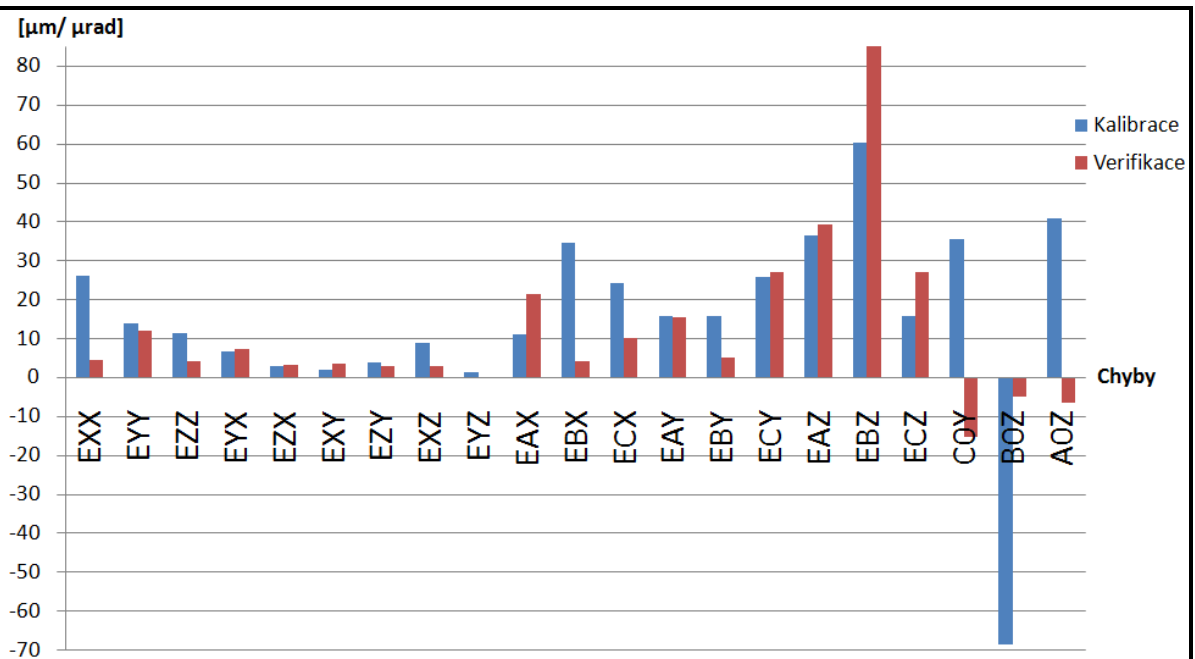
zhoršení. U zbývajících 4 chyb, u kterých také došlo ke zhoršení, hodnota chyba v absolutním vyjádření nepřekročila 3,0 μm .

4.3.2 LASER TRACER

Tab. 4.8 Porovnání výsledků kalibrace a verifikace - Laser tracer

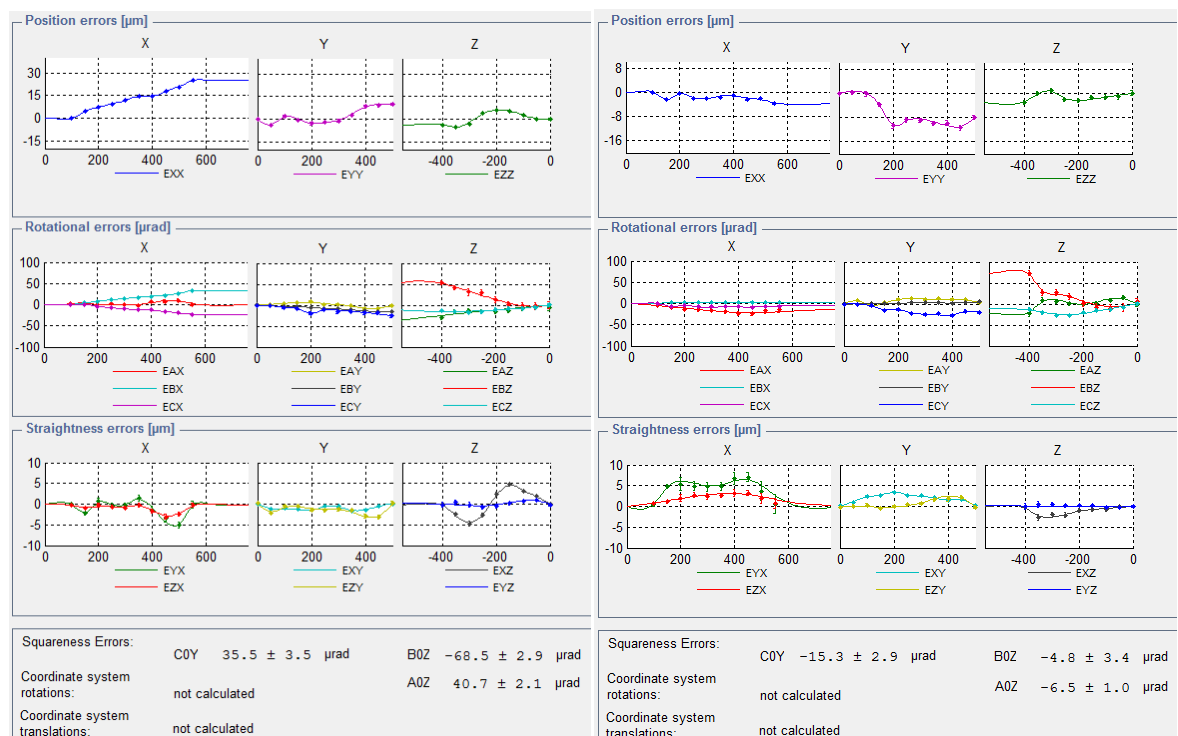
Chyba	Kalibrace [μm]	Verifikace [μm]	U _{max} (95%) [μm]	zlepšení / zhoršení	
				absolutní [μm]	procentuální
EXX	26,1	4,4	0,4	21,7	83,1
EYY	13,8	12,0	1,0	1,8	13,0
EZZ	11,3	4,2	0,9	7,1	62,8
EYX	6,5	7,3	2,1	-0,8	-12,3
EZX	2,9	3,1	1,1	-0,2	-6,9
EXY	1,9	3,5	0,2	-1,6	-84,2
EZY	3,8	3,0	0,6	0,8	21,1
EXZ	9,0	2,8	0,7	6,2	68,9
EYZ	1,3	0,2	0,6	1,1	84,6
Chyba	Kalibrace [μrad]	Verifikace [μrad]	U _{max} (95%) [μrad]	zlepšení / zhoršení	
				absolutní [μrad]	procentuální
EAX	11,1	21,4	6,7	-10,3	-92,8
EBX	34,3	4,1	0,9	30,2	88,0
ECX	24,2	10,1	1,1	14,1	58,3
EAY	15,6	15,5	2,3	0,1	0,6
EBY	15,7	5,1	0,4	10,6	67,5
ECY	25,8	27,0	3,6	-1,2	-4,7
EAZ	36,4	39,4	6,2	-3,0	-8,2
EBZ	60,3	87,1	10,5	-26,8	-44,4
ECZ	15,9	27,0	3,6	-11,1	-69,8
C0Y	35,5	-15,3	2,4	50,8	56,9
B0Z	-68,5	-5,0	3,6	63,5	92,7
A0Z	40,7	-6,5	1,3	47,2	80,0

Z porovnání výsledku kalibrace a verifikace (Tab. 4.8) jsou patrné rozdíly v jednotlivých chybách. Téměř u všech chyb, které jsme schopni u 3-osého stroje ovlivnit, jsme dosáhli jejich snížení. A to v řádu desítek procent. Zhoršení u chyb EYX a EZX je v rámci chyby měření, viz. hodnoty ve sloupci U_{max}. Pouze u chyby EXY nastalo zhoršení větší než chyba měření. Ovšem v absolutním vyjádření se jedná o zhoršení pouze o 1,6 μm . Výrazného zlepšení jsme dosáhli také v případě kolmostí C0Y, B0Z a A0Z. Zde se jednalo o snížení chyby opět v řádu desítek procent. V absolutním vyjádření se jedná dokonce o hodnoty v řádu desítek μrad . Chyby EAX až ECZ bohužel není možné u 3-osého stroje kompenzovat. Pro jejich minimalizaci by bylo třeba doplnit stroj o minimálně jednu další rotační osu.

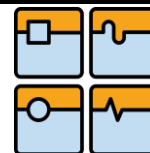


Obr. 4.9 Porovnání výsledků kalibrace a verifikace - Laser tracer

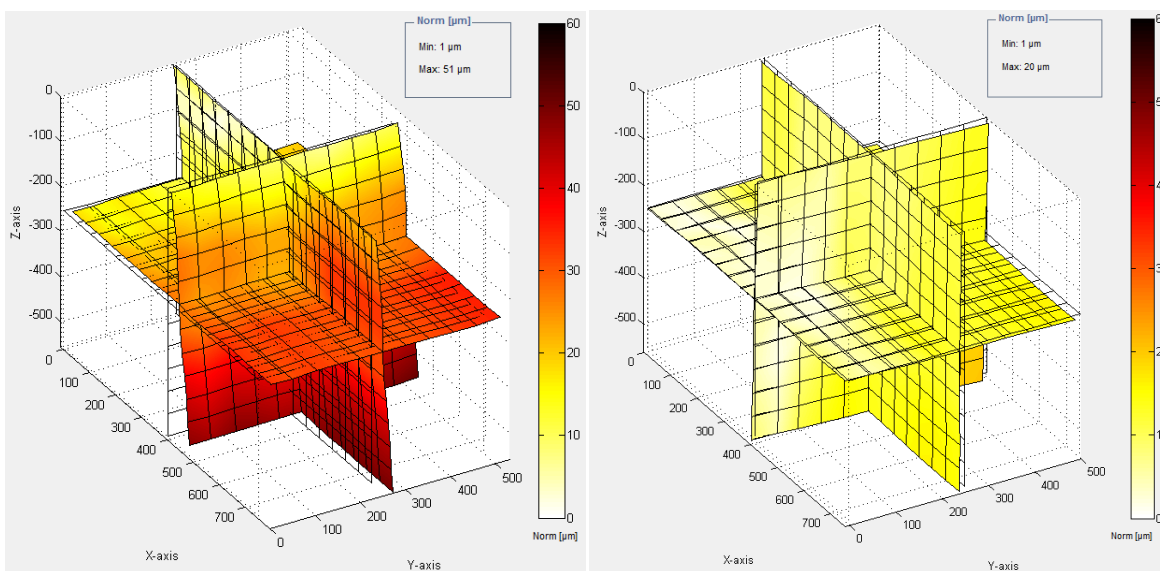
Na obrázku (Obr. 4.10) jsou znázorněny výsledky ze softwaru Trac-Cal. Je zde patrné rozložení a průběh jednotlivých chyb v celém pracovním prostoru stroje vzhledem k souřadnému systému.



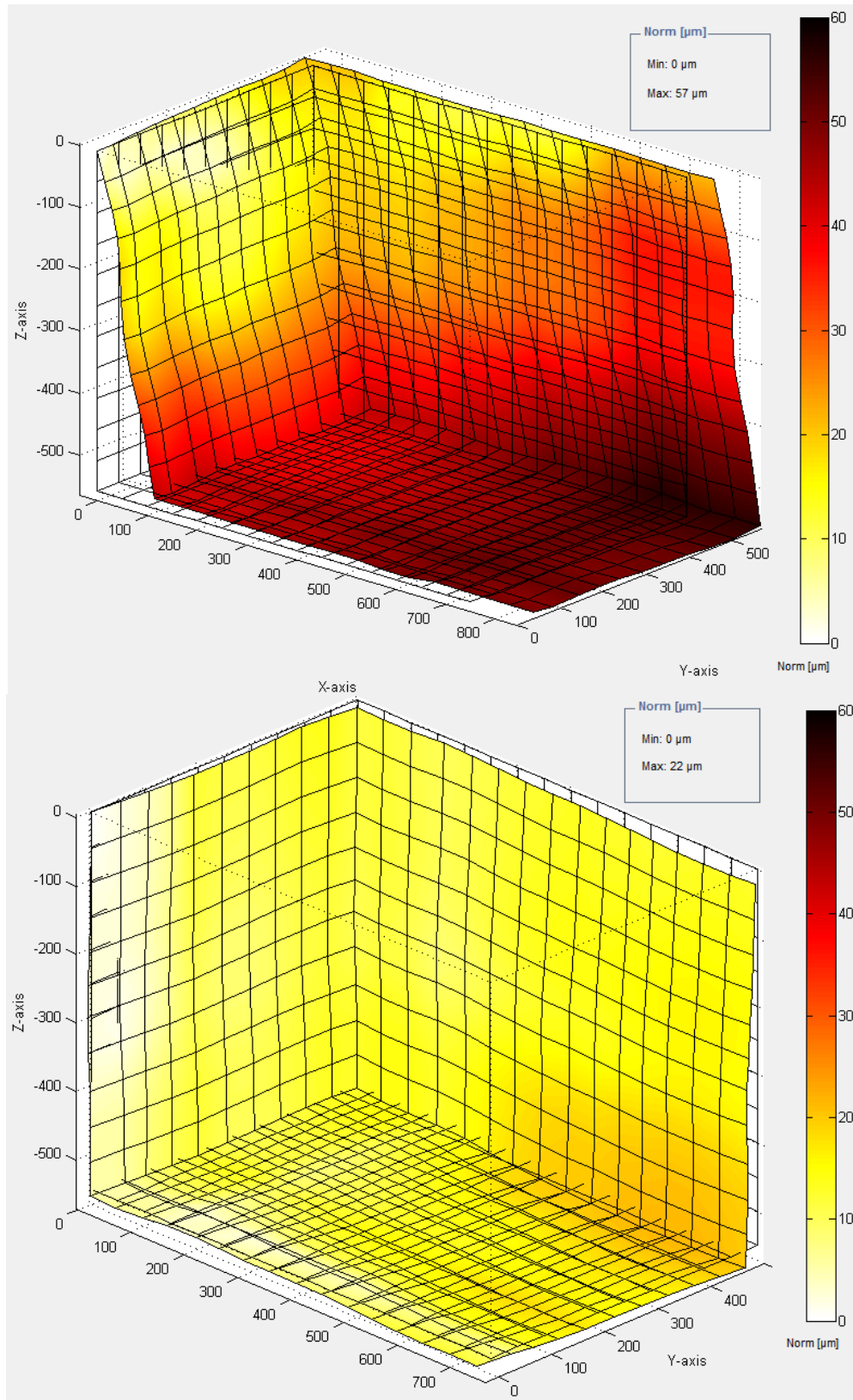
Obr. 4.10 Porovnání výsledků kalibrace a verifikace - Trac-Cal



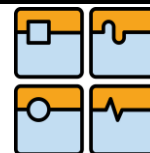
Software Trac-Cal umožňuje vykreslit chybové vektory pomocí rovin do celého pracovního prostoru (Obr.4.11). Pro zjištění maximální chyby v celém prostoru, je nutné tyto roviny posunout na vnější hranici pracovního prostoru (Obr. 4.12). Zde je patrné, že maximální chyba se zmenšila z původní hodnoty $57\ \mu\text{m}$, při kalibračním měření, na hodnotu $22\ \mu\text{m}$, odpovídající verifikačnímu měření. Měřítka i rozsahy stupnic jsou na obou obrázcích nastaveny shodně.



Obr. 4.11 Výsledky kalibrace a verifikace - Trac-Cal, chybové roviny



Obr. 4.12 Výsledky kalibrace a verifikace - Trac-Cal, chybové roviny, maxima

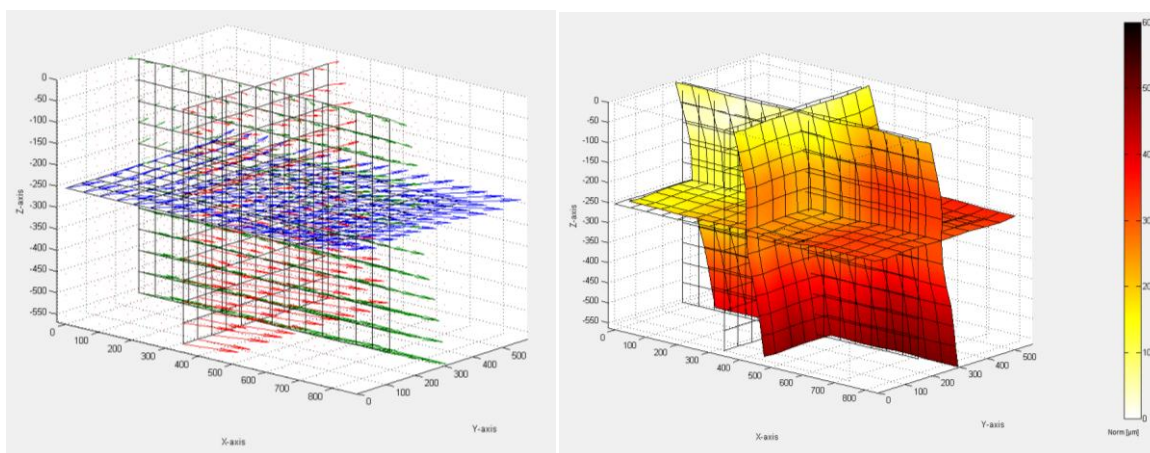


4.4 KONTROLNÍ OBROBEK

V této kapitole je popsán postup návrhu, obrábění a měření 2 kontrolních obrobků na souřadnicovém měřicím stroji. Díky kontrolním obrobkům je možné posoudit a kvantifikovat pracovní přesnost obráběcího stroje.

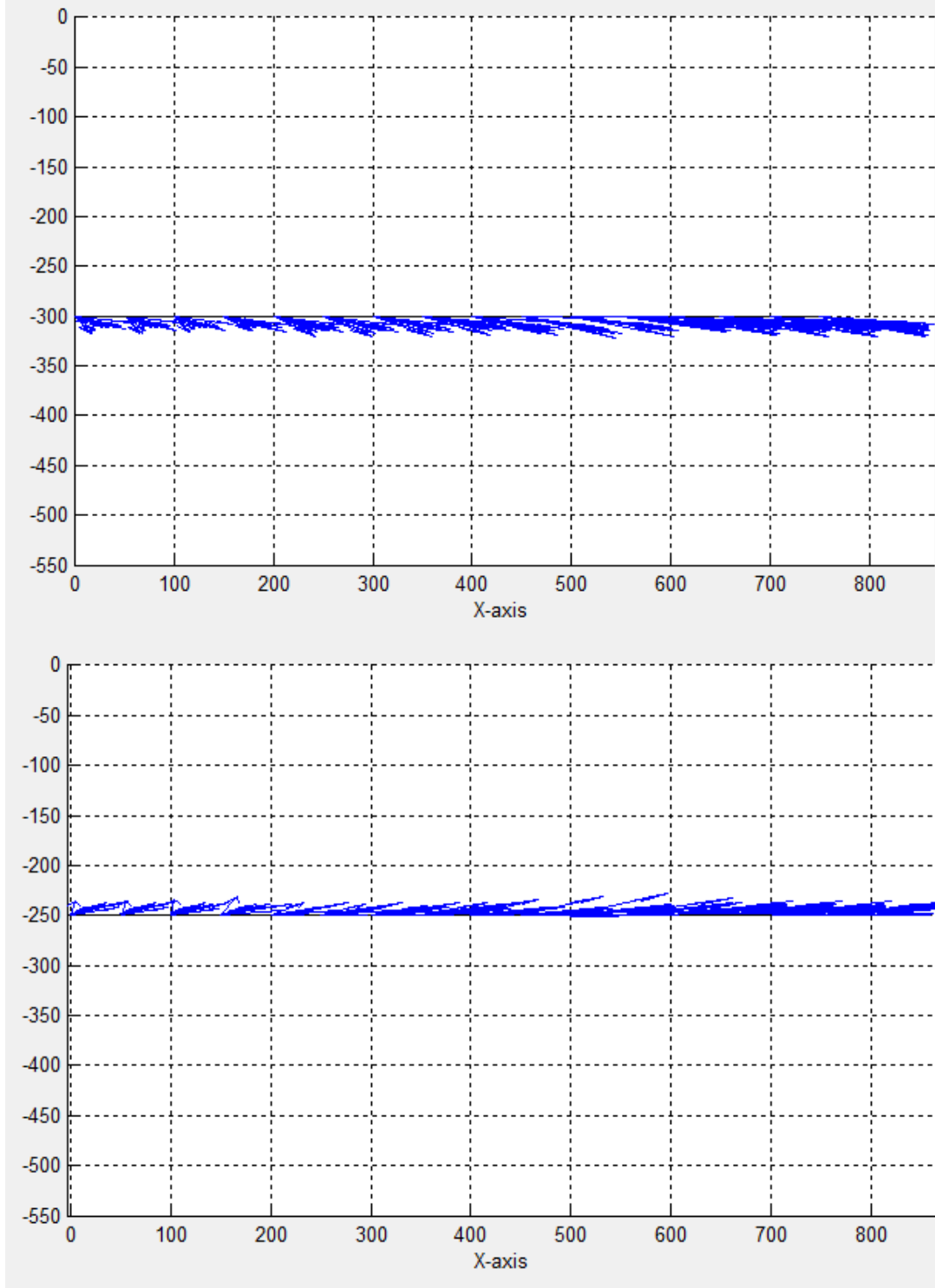
4.4.1 NÁVRH KONTROLNÍHO OBROBKU

Tvar kontrolního obrobku jsem navrhoval na základě mapy chybových vektorů vytvořené programem Trac-Cal při kalibračním měření. Cílem bylo navrhnout takový tvar, aby se při obrábění projevil co nejvíce chyby polohování stroje.



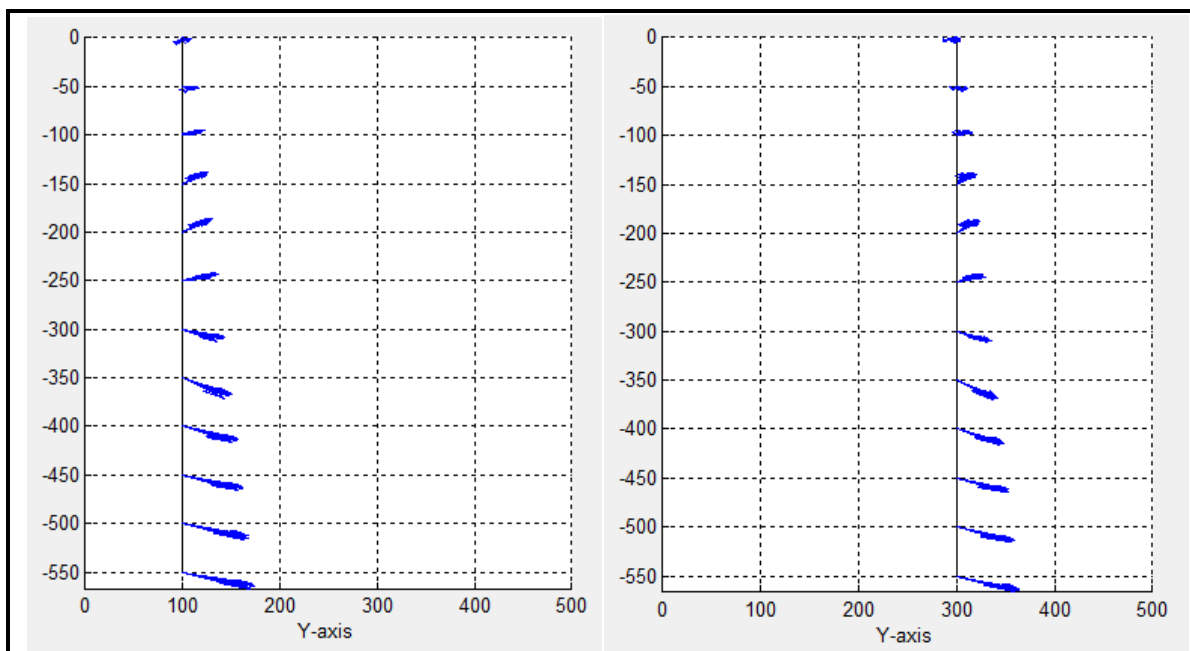
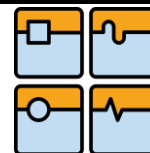
Obr. 4.13 Chybové vektory, kalibrační měření - Laser tracer

Největší rozdíl směru chybových vektorů dle kalibračního měření vychází v rovině XY mezi souřadnicemi $Z = -300\text{mm}$ a $Z = -250\text{mm}$ (Obr. 4.14). Proto jsem zvolil na obrobku 2 roviny ve vzdálenosti přibližně 170mm, pro zjištění odchylky rovinnosti.

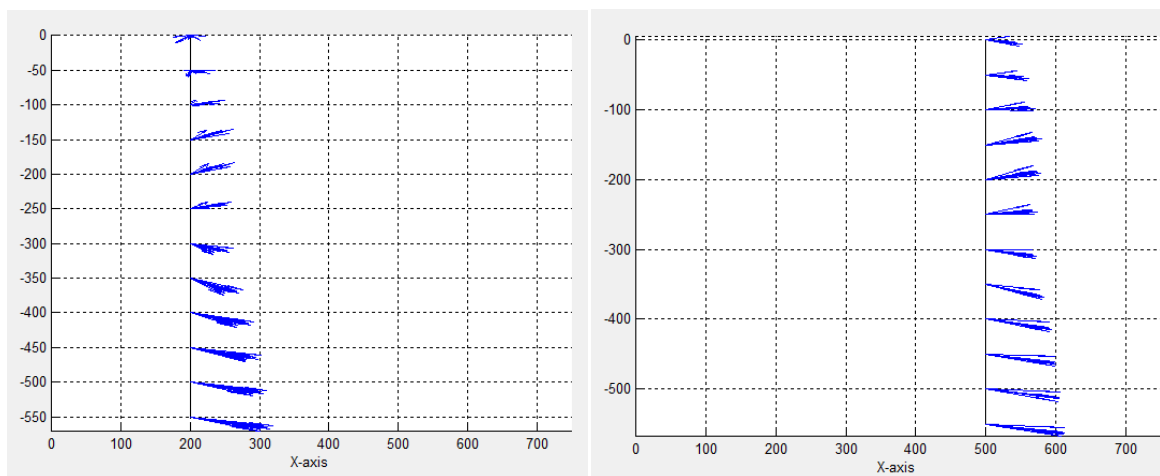


Obr. 4.14 Chybové vektory, kalibrační měření - rovina XY

V rovinách XZ a YZ nenastala podobná změna směru chybových vektorů, ze záporného do kladného směru, jako v rovině XY. Změny směru chybových vektorů v těchto rovinách jsou dobře patrné z následujících obrázků (Obr. 4.15, Obr. 4.16).



Obr. 4.15 Chybové vektory, kalibrační měření - rovina XZ



Obr. 4.16 Chybové vektory, kalibrační měření - rovina YZ

Dále jsem navrhl drážky a kruhové otvory pro zjištění přesnosti kolmostí, rovnoběžností a roztečí děr. Výkres kontrolního obrobku se nachází v příloze(Příloha 1).

Polotovár pro obrábění (Obr.4.17) je svařen ze 2 čtvercových hranolů o rozměru 100x100mm a délkách 300mm a 170mm. Označení materiálu je S355J2G3 dle normy ČSN 42 5520. Jedná se o univerzální nelegovanou konstrukční jemnozrnnou ocel s vysokou vrubovou houževnatostí a zaručenou svařitelností při vyšší mezi kluzu oceli. Ocel 1.0570 (St 52-3, S355J2G3, 11523) je vhodná pro dělení plamenem a plazmou. Pevnost 490 - 630 MPa. Mez kluzu min. 355 MPa. Základní konstrukční ocel 1.0570 (St 52-3, S355J2G3, 11523) je určena pro svařované konstrukce a strojní součásti s vyšší mezi kluzu. Garantovaná tuhost do 0°C. Je vhodná pro použití pro statické, ale i dynamicky namáhané konstrukce.



Obr. 4.17 Polotovar kontrolního obrobku

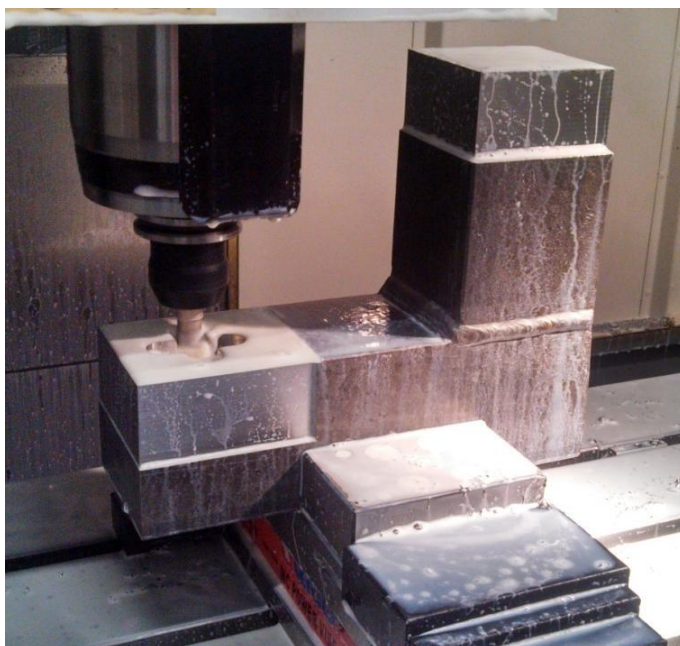
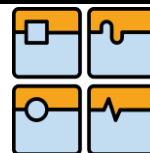
4.4.2 OBRÁBĚNÍ

Obrobek je upnut ve svěráku ve výšce 100mm nad deskou stolu. Spodní dosedací plochu polotovaru bylo nutné před upnutím zarovnat pro maximalizaci styčné plochy se svěrákem.



Obr. 4.18 Polotovar připravený pro obrábění

Nejprve došlo k obrobení horní a dolní vodorovné plochy. Následovaly obvodové plochy a poté frézování drážek do horní a dolní plochy (Obr. 4.19). Poslední operací bylo vytvoření kruhových otvorů. Finální obrobek je zobrazen na obrázku (Obr. 4.20).



Obr. 4.19 Frézování drážky



Obr. 4.20 Finální obrobek

Při frézování obou obrobků došlo vlivem sil od obrábění k jejich pohybu ve svěráku. Tento problém nastal vlivem nedostatečné upínací síly svěráku při obrábění ploch v horní části obrobku, vzhledem k velké vzdálenosti mezi působištem sil od obrábění a místem upnutí obrobku. Proto bylo nutné obrobky vytvořené jak ve výchozím stavu stroje, tak ve stavu s aktivovanými volumetrickými kompenzacemi opravit odebráním více materiálu, než bylo původně dle výkresu požadováno. Toto dodatečné obrábění probíhalo za dokončovacích podmínek, tak aby bylo minimalizováno nebezpečí opětovného pohybu obrobku ve svěráku.

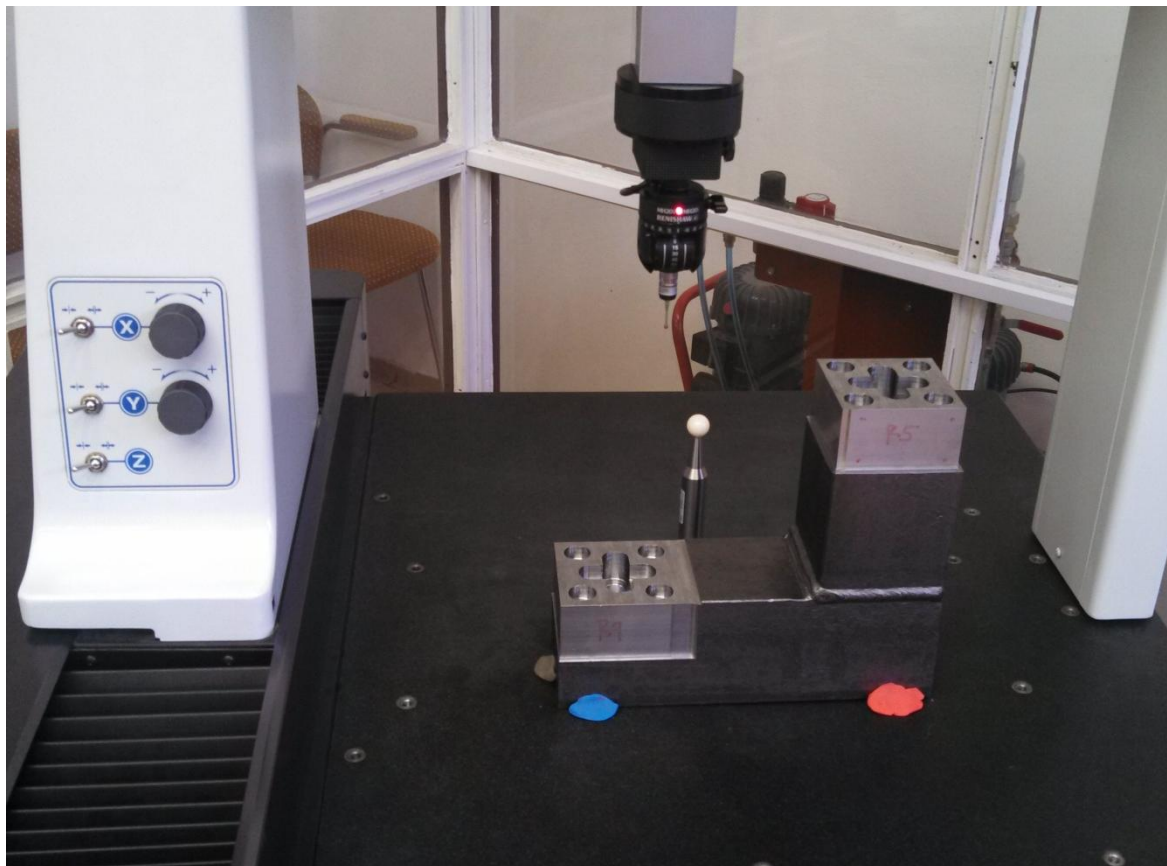


Jiný vyhovující svěrák pro upnutí obrobků nebyl k dispozici. V případě opakování experimentu navrhuji zarovnání bočních stěn obrobku, pro zlepšení dosednutí čelistí svěráku, případně použití svěráku s většími dosedacími plochami pro eliminaci nežádoucího pohybu obrobku při obrábění.

4.4.3 MĚŘENÍ NA CMM STROJI

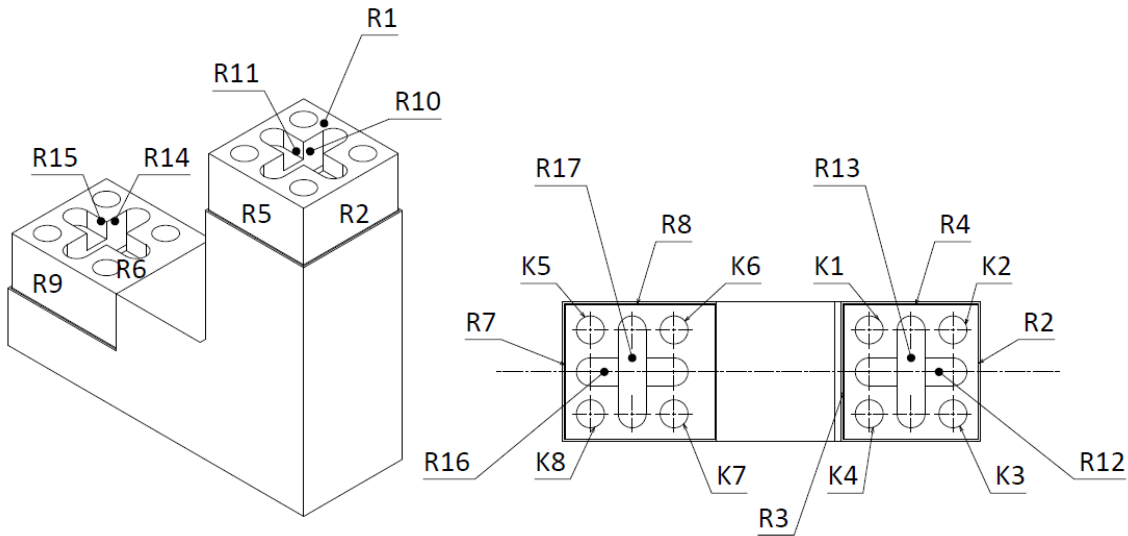
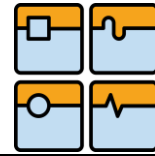
Kontrola přesnosti geometrie obrobků probíhala na stroji Mitutoyo Crysta-Plus M544. Detailní popis tohoto stroje se nachází v kapitole 2.4. Kontrola zahrnovala měření 1. obrobku, který byl obroben ve výchozím stavu stroje (vypnuty volumetrické kompenzace) a měření 2. obrobku, při jehož obrábění byly volumetrické kompenzace aktivovány.

Obrobky byly postupně, jeden po druhém, umístěny na měřicí stůl a samotné měření probíhalo pomocí dotykové sondy od firmy Renishaw (Obr. 4.21). Bylo nutné ruční najíždění k měřeným plochám, jelikož stroj nemá počítačem řízené servopohony. Výsledky byly zpracovány softwarem dodávaným přímo ke stroji.



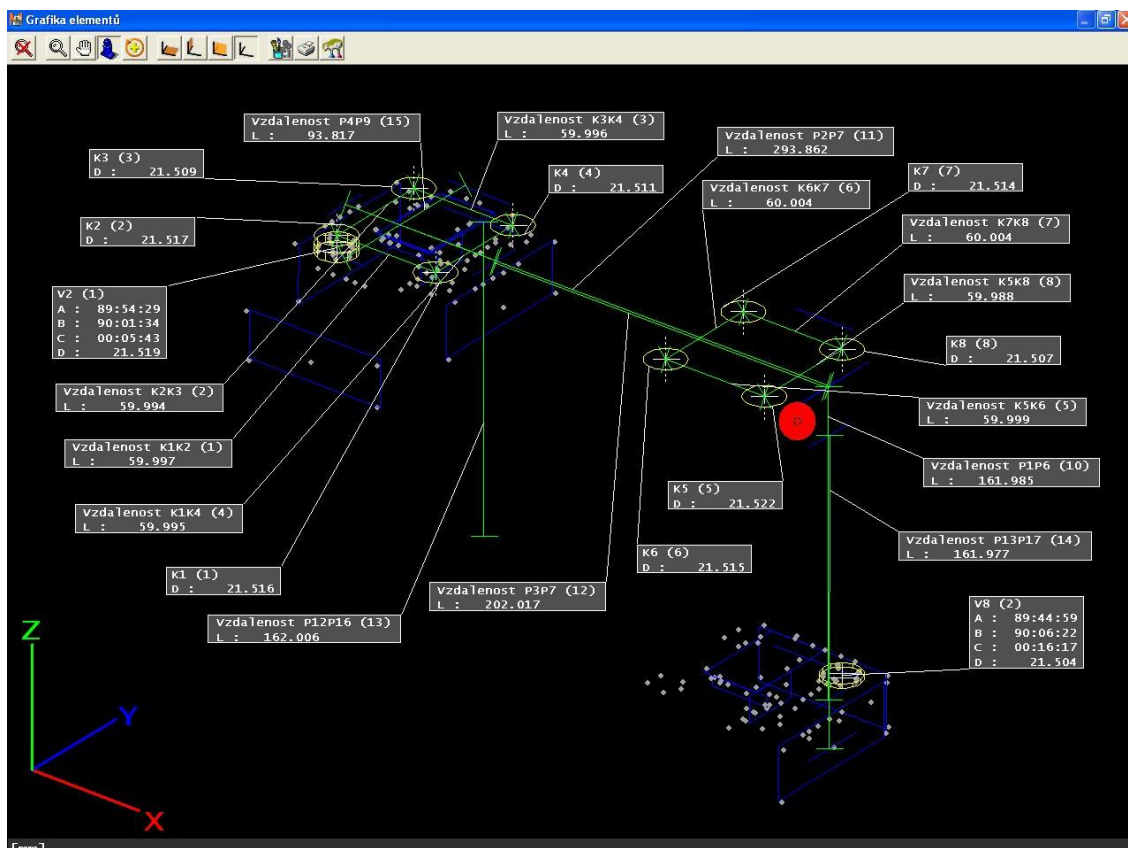
Obr. 4.21 Měření obrobku pomocí souřadnicového měřícího stroje

Pro jednodušší orientaci při vytváření kontrolního programu je potřeba pojmenovat jednotlivé měřené elementy obrobku (Obr. 4.22). Na obrobkách byly kontrolovány roviny(R), kružnice(K), válcové plochy(V) a přímky(P). Číslo odpovídá vždy dané ploše, písmeno identifikuje měřený element, např. na rovině 1 (R1), je zároveň kontrolní přímka 1 (P1). Podobně je tomu i u kružnic a válcových ploch, na válcové ploše (V2) je také kružnice (K2).

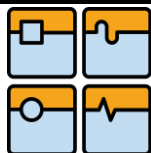


Obr. 4.22 Pojmenování kontrolovaných elementů

Hlavním výstupem z měření pomocí souřadnicového stroje měly být hodnoty rovinnosti, kolmosti a rovnoběžnosti. Na souřadnicovém stroji, který byl k dispozici, bohužel nebyla provedena kalibrace nutná pro tyto měření. Hodnoty těchto geometrických úchylek se mezi jednotlivými měřeními lišily v řádu desetin až jednotek milimetrů. Z toho důvodu je nebylo možné použít k posouzení přesnosti obrobku. Měřil jsem pouze průměry děr, rozteče děr a vzájemné vzdálenosti ploch a přímk (Obr.4.23).



Obr. 4.23 Přehled kontrolovaných elementů

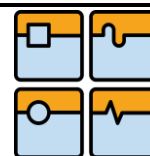


Při porovnání tabulek (Tab. 4.9 a Tab.4.10) je patrný rozdíl mezi průměry děr daný nutností dodatečného obrábění vlivem pohybu obrobku ve svěráku. Největší vypovídací hodnotu o přesnosti polohování mají hodnoty roztečí děr. Z výsledků je patrné, že aktivace volumetrických kompenzací ovlivnila přesnost těchto roztečí hodnotou na úrovni chyby měření, řádově jednotky mikrometrů. Je to dáno malými rozměry kontrolního obrobku. Pro maximalizaci vlivu volumetrických kompenzací by bylo třeba, aby se kontrolní plochy nacházely v pracovním prostoru stroje co nejdále od sebe. Dle obrázku (Obr.4.10) ve vzdálenosti alespoň 500mm a více.

Tab. 4.9 Výsledky měření na CMM stroji - VCS=0

číslo měření	VCS=0							
	1		2		3		4	
	Hodnota [mm]	Odchylka [mm]	Hodnota [mm]	Odchylka [mm]	Hodnota [mm]	Odchylka [mm]	Hodnota [mm]	Odchylka [mm]
průměr K1	21,42505	0,00625	21,42087	0,00682	21,41447	0,01375	21,42391	0,00724
průměr K2	21,40541	0,02041	21,41031	0,02320	21,40316	0,01888	21,40713	0,02414
průměr K3	21,39580	0,01061	21,40693	0,01619	21,38925	0,01327	21,39602	0,01002
průměr K4	21,41658	0,01548	21,42089	0,01088	21,41755	0,00900	21,41039	0,00809
průměr K5	21,40969	0,01900	21,38443	0,01233	21,39338	0,01537	21,38454	0,01370
průměr K6	21,40348	0,02057	21,42424	0,01758	21,39732	0,02253	21,40561	0,01233
průměr K7	21,40937	0,01865	21,41183	0,01101	21,39728	0,02195	21,40576	0,00913
průměr K8	21,40727	0,02469	21,39996	0,01930	21,39344	0,01114	21,40219	0,01470
průměr V2	21,41049	0,02297	21,41086	0,01540	21,40197	0,03146	21,38900	0,01537
průměr V8	21,40920	0,02377	21,40918	0,01451	21,40099	0,02630	21,38780	0,02650
rozteč K1K2	60,00377	-	60,00282	-	59,99999	-	59,99826	-
rozteč K2K3	60,00649	-	59,99607	-	59,99334	-	59,99873	-
rozteč K3K4	59,99413	-	60,00160	-	59,99271	-	59,99286	-
rozteč K1K4	59,99952	-	59,99126	-	59,99523	-	59,99910	-
rozteč K5K6	60,00010	-	59,99585	-	59,99941	-	59,99842	-
rozteč K6K7	59,99964	-	59,98955	-	60,00012	-	59,99241	-
rozteč K7K8	59,99898	-	59,99471	-	60,00010	-	59,99900	-
rozteč K5K8	59,99748	-	59,99124	-	60,00840	-	59,99304	-
vzdálenost P2P3	91,85982	-	91,86005	-	91,86162	-	91,86721	-
vzdálenost P1P6	-	-	-	-	-	-	162,01923	-
vzdálenost P2P7	294,18337	-	294,17801	-	294,17721	-	294,18710	-
vzdálenost P3P7	202,32392	-	202,31791	-	202,31546	-	202,31995	-
vzdálenost P12P16	-	-	-	-	161,96935	-	161,97366	-
vzdálenost P13P17	-	-	-	-	161,66026	-	161,65912	-
vzdálenost P4P9	93,15318	-	93,17113	-	93,13752	-	93,16334	-

Chybějící hodnoty v tabulkách (Tab. 4.9 a Tab. 4.10) nebyly naměřeny. Hodnoty odchylek software nezobrazoval, proto nejsou doplněny.



Tab. 4.10 Výsledky měření na CMM stroji - VCS=1

číslo měření	VSC=1					
	1		2		3	
	Hodnota [mm]	Odchylka [mm]	Hodnota [mm]	Odchylka [mm]	Hodnota [mm]	Odchylka [mm]
průměr K1	21,50480	0,01291	21,51571	0,01485	21,51171	0,01352
průměr K2	21,50789	0,01097	21,51750	0,01155	21,51320	0,01329
průměr K3	21,50954	0,01674	21,50857	0,01240	21,50973	0,01944
průměr K4	21,50938	0,00934	21,51098	0,00631	21,51088	0,00724
průměr K5	21,51294	0,00871	21,52167	0,00605	21,51669	0,00786
průměr K6	21,52576	0,00760	21,51452	0,01463	21,51651	0,00380
průměr K7	21,51592	0,00071	21,51370	0,01154	21,53060	0,00406
průměr K8	21,48861	0,05646	21,50668	0,01113	21,51459	0,00813
průměr V2	21,52035	0,02712	21,51851	0,03446	21,51283	0,02532
průměr V8	21,50788	0,01667	21,50372	0,02197	21,51449	0,02622
rozteč K1K2	59,99780	-	59,99684	-	59,99629	-
rozteč K2K3	59,99011	-	59,99414	-	59,99186	-
rozteč K3K4	59,99820	-	59,99623	-	59,99916	-
rozteč K1K4	59,99270	-	59,99504	-	59,99586	-
rozteč K5K6	59,99619	-	59,99934	-	59,99944	-
rozteč K6K7	59,99304	-	60,00355	-	59,99578	-
rozteč K7K8	60,02385	-	60,00376	-	59,99844	-
rozteč K5K8	59,97388	-	59,98789	-	59,99051	-
vzdálenost P2P3	91,84889	-	91,84516	-	91,84771	-
vzdálenost P1P6	161,99170	-	161,98536	-	161,97849	-
vzdálenost P2P7	293,86439	-	293,86203	-	293,87008	-
vzdálenost P3P7	202,01553	-	202,01718	-	202,02231	-
vzdálenost P12P16	162,00348	-	162,00603	-	161,99370	-
vzdálenost P13P17	161,97882	-	161,97691	-	161,96768	-
vzdálenost P4P9	93,75606	-	93,81733	-	93,80903	-

Pro opravdu přesnou kontrolu obrobku, je nutné použít kalibrovaný souřadnicový měřicí stroj. Vzhledem k nedostatku času danému blížícím se termínem odevzdání práce a dlouhým čekacím dobám, pokud bych si nechal obrobky změřit například u firmy Renishaw, nejsem schopen jednoznačně určit přínos volumetrické kompenzace pro pracovní přesnost stroje ve mnou zkoumaném případě.



ZÁVĚR

Zvýšení přesnosti obráběcích strojů s použitím volumetrické kompenzace je nesporné a v dnešní době se tato metoda prosazuje v praxi mnohem více, než tomu bylo dříve. Jedná se o relativně jednoduchou a snadnou metodu zvýšení přesnosti např. ve srovnání se snahou o docílení ideální přesnosti geometrie nosné struktury obráběcího stroje. Ať už se jedná o maximální tuhost konstrukce, přímost vodících ploch apod. Samozřejmě pomocí volumetrických kompenzací není možné eliminovat všechny nedostatky a nepřesnosti stroje, ovšem především u velkých obráběcích strojů je možné jejich vliv snížit na únosnou mez.


V první kapitole je uveden přehled jednotlivých typů přesností obráběcích strojů. Dále také výčet chyb při lineárním a rotačním pohybu os stroje dle normy ISO-230, která se zabývá způsoby měření těchto chyb.

Zařazená, která byla pro vypracování této práce použita, jsou popsána a jejich princip fungování je vysvětlen v kapitole číslo dva. Stěžejními zařízeními byly především systém Ballbar od firmy Renishaw a Laser Tracer patřící do produktového portfolia firmy Etalon.


Demonstrátoru, neboli stroji, který byl měřen a s použitím volumetrických kompenzací zpřesňován, je věnována podkapitola **3.1**. Jedná se o vertikální obráběcí centrum vyráběné firmou KOVOSVIT MAS. V kapitole **3** je dále popsán postup měření a detailně krok po kroku vysvětlena práce se softwarovými programy sloužícími k obsluze Ballbaru a Laser Traceru.

Shrnutí a vyhodnocení výsledků kalibrace a verifikace je uvedeno v kapitole **4**. Výsledky jsou zpracovány jednak ve formě grafických výstupů softwaru Ballbaru a Laser Traceru, ale také ve formě přehledných tabulek. V podkapitole **4.4** je popsán postup návrhu, obrábění a měření přesnosti kontrolních obrobků.

Hlavním přínosem této práce mělo být jednoznačné potvrzení nebo vyvrácení zásadního vlivu volumetrických kompenzací na zvýšení pracovní přesnosti víceúčelového obráběcího centra, jehož posuvy na jednotlivých osách nedosahují ani hodnoty 1000mm. Jedná se tedy o poměrně malý stroj. U strojů s posuvy v řádech tisíců milimetrů, např. velké portálové stroje, byl přínos volumetrických kompenzací jednoznačně prokázán. I přes finanční náročnost nákupu opce pro aktivaci volumetrických kompenzací v řídicím systému obráběcího stroje se uživateli vyplatí. Především je to dáno velikostí a cenou rozměrných obrobků na těchto strojích. U malých strojů, jako je například mnou měřený, je reálný přínos a úspora financí pro uživatele v případě nákupu opce a užívání volumetrických kompenzací velmi diskutabilní. Jak vyplývá z výsledků měření, na mnou navrhnutém obrobku se přínos volumetrických kompenzací na zpřesnění projevuje v řádu mikrometrů, což je hodnota na úrovni odchylky měření při kalibraci jednotlivých chyb stroje pomocí Laser Traceru. Pro výraznější zvýšení pracovní přesnosti, o více než 10 μm , by se muselo jednat o rozměrný a složitý obrobek, který by zabíral převážnou část pracovního prostoru stroje. Více než 500mm v ose X a přes 300mm v osách Y a Z. V takovém případě se ale výrazně blížíme hranici maximálního zatížení stolu stroje na hodnotě 400kg, pokud by se jednalo o obrobek z oceli. Výsledky z měření souřadnicovým měřicím strojem ovšem nejsou ideální, jak je detailně vysvětleno v podkapitole **4.4.3**. Protože CMM stroj, který jsme měli na Fakultě strojního inženýrství VUT k dispozici, nebyl plně kalibrován, nemohl jsem proto použít výsledky měření kolmostí, rovinností a rovnoběžností. Vzhledem k

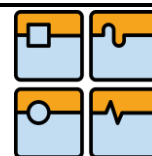
Str. 66	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

výrazným zlepšením parametrů odchylek kolmosti na jednotlivých osách, by mělo být zlepšení přesnosti obrobku díky volumetrickým kompenzacím výrazné. Abych toto mohl posoudit, bylo by nutné zkontrolovat zkušební obrobky na jiném souřadnicovém měřicím stroji. Z časových důvodů to ovšem nebylo možné. Na základě výsledků uvedených v této práci, si myslím, že použití volumetrických kompenzací u mnou zkoumaného stroje pro méně rozměrné obrobky není vzhledem k finanční stránce vhodné. V případě využití rozměrových limitů pracovního prostoru stroje při obrábění velkých obrobků, by se nad nákupem opce pro volumetrické kompenzace dalo uvažovat. Rozhodující faktory by byly následující: požadovaná přesnost, cena a počet obrobků. Bylo by tudíž třeba důkladné finanční analýzy zakázky.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 67
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] WECK, Manfred. *Werkzeugmaschinen*. 7. neu bearb. Aufl. Berlin: Springer, 2006, XVII, 502 s. ISBN 3-540-22505-6.
- [2] ERAZIM, Karel. *Kontrola přesnosti obráběcích strojů*. 2. přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1961, 339 s. Řada strojírenské literatury.
- [3] MEHRABI, M.G.; O'NEAL, G. *Improving machining accuracy in precision line boring*. Netherland : Kluwer Academic Publisher, 2002.
- [4] ETALON AG [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.etalon-ag.com/>.
- [5] Renishaw [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com>.
- [6] KOVOSVIT MAS [online]. 2015 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.kovosvit.cz/>.
- [7] 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, 1998.
- [8] ČSN ISO 230-4. Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 4: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [9] MALÝ, P. *Měření geometrické přesnosti obráběcích strojů zařízením Laser Tracer*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Knobloch, MSc.
- [10] *Měřicí přístroje, kalibrace měřidel, kalibrační laboratoř* [online]. 2010 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.merici-pristroje.cz/lasertracer/>.
- [11] XPT – PRAKTICKÁ METROLOGIE Měření laserinterferometrem [online]. 2015 [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2743213/>.
- [12] *O technologii GPS* [online]. 2012 [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: http://eu.mio.com/cs_cz/global-positioning-system-co-je-trilaterace.htm.
- [13] *MM Průmyslové spektrum: Nová dimenze kalibrace strojů*. Praha: Vogel Publishing, 2011. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/>.
- [14] TESTO [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.testo.cz/>.
- [15] MITUTOYO [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://mitutoyo.cz/>.
- [16] HOLUB, M. *GTS - Testování obráběcích strojů* [přednášky]. Brno: VUT 2014




SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Schéma odchylek tříosé kinematiky	14
Obr. 1.2 Odchylky rotační osy	15
Obr. 2.1 Renishaw Ballbar QC20-W	17
Obr. 2.2 Renishaw Ballbar QC20-W, úhlový rozsah.....	18
Obr. 2.3 Princip fungování interferometru.....	20
Obr. 2.4 Princip trilaterace u GPS.....	20
Obr. 2.5 Laser tracer	21
Obr. 2.6 Externí jednotka Laser Traceru od firmy SIOS	21
Obr. 2.7 Testo Saveris báze	23
Obr. 2.8 Sonda Testo Saveris PtD, osa X	23
Obr. 2.9 Sonda Testo Saveris PtD, osa Y	24
Obr. 2.10 Sonda Testo Saveris PtD, osa Z.....	24
Obr. 2.11 Souřadnicový měřicí stroj Mitutoyo Crysta-Plus M544	25
Obr. 3.1 Vertikální frézka MCV 754 QUICK	28
Obr. 3.2 Výrobní štítek měřeného stroje MCV 754 QUICK	28
Obr. 3.3 Renishaw Ballbar 20, úvodní nabídka	29
Obr. 3.4 Renishaw Ballbar 20, volba stroje	29
Obr. 3.5 Renishaw Ballbar 20, nastavení rychlého testu	30
Obr. 3.6 Renishaw Ballbar 20, nastavení rychlého testu	30
Obr. 3.7 Renishaw Ballbar 20, přehled testu	31
Obr. 3.8 Renishaw Ballbar 20, generátor programu	31
Obr. 3.9 Kalibrátor systému ballbar.....	31
Obr. 3.10 Ustavení magnetického držáku	32
Obr. 3.11 Měření pomocí ballbaru.....	32
Obr. 3.12 Trac-Cal, úvodní nabídky a zároveň záložka Plan	33
Obr. 3.13 Trac-Cal výběr modelu	34
Obr. 3.14 Trac-Cal nastavení	34
Obr. 3.15 Trac-Cal plánování strategie měření	35
Obr. 3.16 Měřicí pozice 1, pozice v Trac-Cal a skutečná pozice na stroji	36
Obr. 3.17 Měřicí pozice 2, pozice v Trac-Cal a skutečná pozice na stroji	36
Obr. 3.18 Měřicí pozice 3, pozice v Trac-Cal a skutečná pozice na stroji	36
Obr. 3.19 Měřicí pozice 4, pozice v Trac-Cal a skutečná pozice na stroji	37
Obr. 3.20 Měřicí pozice 5, pozice v Trac-Cal a skutečná pozice na stroji	37
Obr. 3.21 Měřicí pozice 6, pozice v Trac-Cal a skutečná pozice na stroji	37
Obr. 3.22 Trac-Cal simulace	38
Obr. 3.23 Trac-Cal záložka Measure	39
Obr. 3.24 Trac-Cal měření	39
Obr. 3.25 Trac-Cal záložka Evaluate	40
Obr. 3.26 Trac-Cal, Check data	40
Obr. 3.27 Trac-Cal záložka Evaluate, show results	41
Obr. 3.28 Trac-Cal záložka Evaluate, zobrazení chyb v prostoru pomocí rovin.....	42
Obr. 3.29 Trac-Cal záložka Evaluate, zobrazení kolmostí os.....	42
Obr. 3.30 Trac-Cal záložka Evaluate, zobrazení reziduí a histogramů.....	43
Obr. 3.31 Trac-Cal záložka Quali	43
Obr. 4.1 Ballbar rovina XY - kalibrace.....	45
Obr. 4.2 Ballbar rovina YZ - kalibrac	45
Obr. 4.3 Ballbar rovina XZ - kalibrace	46
Obr. 4.4 Kalibrace, průběh teplot.....	47

Obr. 4.5 Ballbar rovina XY - verifikace	48
Obr. 4.6 Ballbar rovina YZ - verifikace.....	48
Obr. 4.7 Ballbar rovina XZ - verifikace.....	49
Obr. 4.8 Verifikace, průběh teplot	50
Obr. 4.9 Porovnání výsledků kalibrace a verifikace - Laser tracer.....	53
Obr. 4.10 Porovnání výsledků kalibrace a verifikace - Trac-Cal	53
Obr. 4.11 Výsledky kalibrace a verifikace - Trac-Cal, chybové roviny	54
Obr. 4.12 Výsledky kalibrace a verifikace - Trac-Cal, chybové roviny, maxima	55
Obr. 4.13 Chybové vektory, kalibrační měření - Laser tracer	56
Obr. 4.14 Chybové vektory, kalibrační měření - rovina XY	57
Obr. 4.15 Chybové vektory, kalibrační měření - rovina XZ.....	58
Obr. 4.16 Chybové vektory, kalibrační měření - rovina YZ.....	58
Obr. 4.17 Polotovár kontrolního obrobku.....	59
Obr. 4.18 Polotovár připravený pro obrábění	59
Obr. 4.19 Frézování drážky	60
Obr. 4.20 Finální obrobek.....	60
Obr. 4.21 Měření obrobku pomocí souřadnicového měřicího stroje.....	61
Obr. 4.22 Pojmenování kontrolovaných elementů	62
Obr. 4.23 Přehled kontrolovaných elementů	62

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Technické parametry systému ballbaru QC20-W	18
Tab. 2.2 Technické parametry Laser traceru	22
Tab. 2.3 Technická data Testo Saveris	22
Tab. 2.4 Technická data Mitutoyo Crysta-Plus M544.....	25
Tab. 3.1 Technické parametry vertikální frézky MCV 754 QUICK	28
Tab. 3.2 Pozice Laser Traceru	35
Tab. 4.1 Výsledky kalibrace - Laser tracer	46
Tab. 4.2 Detaily kalibrace.....	47
Tab. 4.3 Výsledky verifikace - Laser tracer.....	49
Tab. 4.4 Detaily verifikace	50
Tab. 4.5 Porovnání výsledků kalibrace a verifikace - Ballbar rovina XY	51
Tab. 4.6 Porovnání výsledků kalibrace a verifikace - Ballbar rovina YZ	51
Tab. 4.7 Porovnání výsledků kalibrace a verifikace - Ballbar rovina XZ	51
Tab. 4.8 Porovnání výsledků kalibrace a verifikace - Laser tracer.....	52
Tab. 4.9 Výsledky měření na CMM stroji - VCS=0.....	63
Tab. 4.10 Výsledky měření na CMM stroji - VCS=1.....	64

Str. 70	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Výkres kontrolního obrobku