



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

STAVBA A KONTROLA 5-OSOVÝCH **FRÉZOVACÍCH STROJŮV**

BUILDING AND CONTROL OF 5-AXIS MILLING MACHINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MILAN ANDERLE

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: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Milan Anderle

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

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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

Stavba a kontrola 5ti osých frézovacích strojů

v anglickém jazyce:

Building and control of 5-axis milling machines

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pětiosé obráběcí centra patří mezi stroje, které mají vysoký potenciál nasazení v dalších deseti letech. Mezi jejich přednosti patří vysoká univerzálnost, preciznost, vysoký stupeň automatizace, které jsou uplatnitelné pro obrábění tvarově velmi náročných dílců. Cílem práce je popsat aktuální trendy v oblasti stavby a kontroly 5ti osých obráběcích frézovacích strojů.

Cíle bakalářské práce:

- podrobná rešerše definovaného úkolu
- zpracování bakalářské práce definovaného úkolu v oblasti pětiosých obráběcích center

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, Pič J., Obráběcí stroje - konstrukce a výpočty. 2. vyd. Praha: SNTL, 1986. 573 s. ISBN 04-235-86
- Janíček P, Ondráček E, Vrbka J,: pružnost a pevnost I
- Hoschl C.: Pružnost a pevnost ve strojnictví
- Weck M, Brecher Ch, Werkzeugmaschinen: Konstruktion und Berechnung. 2006. uberarb. Auflage. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2006. 701 s. ISBN 3-540-22502-1.

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 24.11.2014

L.S.

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

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

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá rešeršou stavby a kontroly päťosových CNC obrábacích strojov. Popísané sú tu i najmodernejšie metódy merania geometrickej presnosti a kompenzácie geometrických a volumetrických chýb. Medzi prístroje, ktoré boli použité na meranie geometrickej presnosti na stroji MCV 754 Quick patria laser interferometerer XL-80 a systém ballbar QC20-W. Cieľom práce je popísať aktuálne trendy v oblasti stavby a kontroly päťosových obrábacích strojov.

Kľúčové slová

päťosové CNC obrábacie stroje, meranie presnosti polohy a opakovateľnosti, laserový interferometer, ballbar

Abstract

This bachelor's thesis studies the building and control of the five-axis CNC machining centres. Modern methods of geometric accuracy measurements are described with possibilites of compensating for geomeric and volumetric errors. Measuring devices described in this thesis are laser interferometer XL-80 and ballbar QC20-W for measuring geometric accuracy of MCV 754 Quick machine.

The aim of the thesis is to describe current trends in construction, design and controlling of five-axis milling machines.

Key words

five-axis CNC milling machines, measuring positioning and repeatability, laser interferometer, ballbar

Čestné prehlásenie

Týmto prehlasujem, že som vypracoval bakalársku prácu samostatne za použitia literárnych zdrojov a prameňov, ktoré sú uvedené v zozname použitej literatúry.

V Brne dňa 29. 5. 2015

Milan Anderle

Pod'akovanie

Týmto ďakujem bakalárskej práci Ing., Dipl.-Ing Michalovi Holubovi, Ph.D. za jeho čas pri meraní a tiež cenné rady, nápady a poskytnuté materiály pre vypracovanie tejto práce

Táto práca vznikla za podpory a na prístrojovom vybavení NETME Centre, regionálneho výskumného a vývojového centra vybudovaného z finančných prostriedkov OP VaVpl v rámci projektu NETME Centre (Nové technológie pro strojírenství), Reg. č.: CZ.1.05/2.1.00/01.0002 a podporovaného v nadväzujúcej fázy udržateľnosti prostredníctvom projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančného príspevia MŠMT v rámci účelovej podpory programu NPU I.

Bibliografická citácia

ANDERLE, M. *Stavba a kontrola 5ti osých frézovacích strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 58 s. Vedoucí bakalářské práce Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D..

Obsah

1. Úvod	11
2. Ciele práce	12
3. Stavba 5-osových frézovacích strojov	13
3.1. O 5-osovom obrábaní	13
3.2. Pracovný priestor a riadiaci systém	15
3.3. Požiadavky kladené na obrábacie stroje	16
3.4. Požiadavky na konštrukciu	17
3.4.1. Statická tuhosť	17
3.4.2. Dynamická tuhosť	17
3.4.3. Teplotná stabilita	18
3.4.4. Uloženie stroja a topológia nosných sústav	18
3.5. Kinematické štruktúry 5-osových obrábacích strojov	18
4. Kontrola 5-osových frézovacích strojov	21
4.1. Chyby presnosti obrábania	21
4.2. Geometrická a volumetrická presnosť	22
4.2.1. Geometrická presnosť	22
4.2.2. Volumetrická presnosť	23
4.3. Meranie geometrickej presnosti 5-osových obrábacích strojov	23
4.4. Ballbar	24
4.5. Laserová interferometria	25
4.5.1. Laser interferometer XL-80	25
4.5.2. Vplyv prostredia na presnosť interferometru	26
4.6. Meranie presnosti polohovania	26
4.7. Meranie priesečníku osí rotácie	27
4.8. Test kruhovej interpolácie	28
5. Vlastné meranie	29
5.1. Meraný stroj	29
5.2. Postup vyrovnania stola – meranie rovnobežnosti	29
5.3. Postup merania ballbarom	30
5.4. Meranie presnosti polohovania a opakovateľnosti	31
6. Zhrnutie výsledkov merania	32

6.1. Výsledky merania rovnobežnosti stola	32
6.2. Výsledky merania obvodového hádzania	32
7. Záver	33
Zoznam použitej literatúry	34
Zoznam obrázkov	36
Zoznam tabuliek	36
Zoznam príloh	36
Prílohy	37

1. Úvod

Pokročilé technológie, ktoré denne používame pre uľahčenie našich životov, sú všade vŕokol nás, avšak len málokedy sa zamyslíme, aká bola cesta súčiastky automobilu či motoru lietadla od základnej suroviny po hotovú vec.

Ľudská kreativita spojená s úsilím vytvorili v priebehu stáročí a tisícročí rad výrobných strojov. Zdokonalením výrobných strojov, technológií, postupov a vedomostí v oblasti výroby sa ľudstvo dostalo do etapy, kedy plno automatizované stroje preberajú náročnú a monotónnu prácu za nás. Vo výrobe používame moderné počítačom riadené stroje, bežne nazývané CNC stroje (z angl. Computer Numeric Control). V posledných dvoch dekádach umožnili informačné technológie vytvoriť také výrobné systémy, aké dnes môžeme označovať päťosové obrábanie.

Päťosové obrábanie je najpokročilejším výrobným procesom súčasnosti, kde je možné vyrábať tvarovo veľmi zložitú produkty obrábaním a to vďaka prepojenosti komplexných riadiacich systémov, odolnej konštrukcie a plynulými pohybmi nástroja voči obrábanému povrchu. To so sebou prináša okrem mnohých výhod aj nové problémy, kde je potrebné stroj pravidelne kontrolovať a udržiavať ho tak, aby výroba bola čo najpresnejšia. Nové postupy v metrológii boli zostavené, kde výrobná presnosť sa meria najmodernejšími optoelektronickými prístrojmi ako je laserový interferometer alebo systém ballbar.

Táto bakalárska práca poskytuje čitateľovi prehľad o hlavných princípoch stavby a kontrolovaní päťosových strojov, ktoré sú dnes štandardom.

2. Ciele práce

Problematika konštrukcie 5-osových CNC obrábacích strojov je rozsiahla a ďaleko prevyšuje povolený rozsah bakalárskej práce. Pre toto obmedzenie je práca zameraná na spracovanie rešeršnej časti v oblasti stavby päťosových CNC obrábacích strojov, ich rozdeleniu podľa kinematickej štruktúry a spracovanie rešerše o kontrole CNC obrábacích strojov.

V rámci bakalárskej práce boli vykonané merania geometrickej presnosti na stroji ÚVSSR Kovosit MAS MCV 754 Quick.

3. Stavba 5-osových frézovacích strojov

CNC obrábacie stroje majú v priemysle široké zastúpenie v podobe sústruhov, frézovačiek, vŕtačiek, brúsok už dlhú dobu. CNC obrábacie stroje môžeme rozdeliť do niekoľkých hlavných kategórií, ktoré sú zobrazené v nasledujúcej tabuľke 1.

Tab. 1: Rozdelenie CNC strojov do kategórií [1]

Kinematika	Jednouúčelové	Obrábacie centrá	Multifunkčné obrábacie centrá
<ul style="list-style-type: none"> • sériová • paralelná • zmiešaná 	<ul style="list-style-type: none"> • sústružnícke • frézovacie • vŕtacie, zahlbovacie, závitovacie • brúsne • vyvrtávacie • výroba ozubenia (najmä odvalovaním) 	<ul style="list-style-type: none"> • rotačné obrobky • nerotačné obrobky 	<ul style="list-style-type: none"> • rotačné obrobky • nerotačné obrobky

Od samotného počiatku stavby 5-osového obrábacieho stroja je nutné myslieť na vysoké nároky, ktoré trh kladie na výrobcov strojov. Výrobcovia musia vytvoriť taký stroj, aby prednosti 5-osovej technológie boli využité čo najlepšie [1].

Kapitola č. 4 sa venuje popísaniu problematiky stavby frézovacích strojov, ktoré používajú technológiu 5-osového obrábania. V tejto kapitole sú popísané základné požiadavky na stroje základné rozdelenie 5-osových strojov spolu s ich kinematickými štruktúrami. Prevažná väčšina strojov patrí k frézovacím.

3.1. O 5-osovom obrábaní

Päťosové obrábanie je výrobný proces, v ktorom je možné pohybovať nástrojom v piatich smeroch.

Vrták v jednoduchej stolovej vŕtačke sa môže pohybovať nahor a nadol, čo predstavuje 1 smer. Väčšina CNC frézovačiek je 3-osová, čo znamená, že fréza sa môže pohybovať nahor a nadol, dopredu a dozadu, doprava a doľava. Počítačové riadenie 3-osového stroja dovoľuje nástroju pohybovať sa súčasne v troch smeroch a obrábať tak povrchy a zložité povrchy presne.

Avšak 3-osový stroj môže obrábať len z jednej perspektívy, typicky zvrchu (pri vertikálnej frézovačke) alebo z boku (pri horizontálnej frézovačke). To prináša problém s obrábaním viacerých strán, kedy sa vyžaduje zmena polohy obrobku a ďalšie upínanie. Pridaním 2 rotačných osí dokážeme obrábať 5 strán na jedno upnutie, keďže sa sústava nástroj-obrobok dokážu voči sebe relatívne natočiť do dovolených smerov. Takýto druh obrábania sa nazýva 5-stranové obrábanie, tzv. „3+2“ [2].

Vývoj CNC obrábania v priemysle smeroval k vytvoreniu takého stroja, kde by bolo možné súvislé naklápanie a pohyb nástroja v priebehu obrábania bez

prerušovania. Ťažko dostupné miesta na zložitom povrchu by bolo možné vyrobiť pri jednom upnutí, čo nebolo možné pri trojosovom stroji. Nová technológia so sebou prináša i výhody a nevýhody, ktoré sú zobrazené v tab. 2.:

Tab. 2: Hlavné výhody a nevýhody 5-osových strojov [3]

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> • obrábanie zložitých tvarov • jedno upnutie do stroja • skrátenie vedľajších časov 	<ul style="list-style-type: none"> • vyššie obstarávacie náklady • zložitejšia kinematika vyžaduje nové metódy kontroly

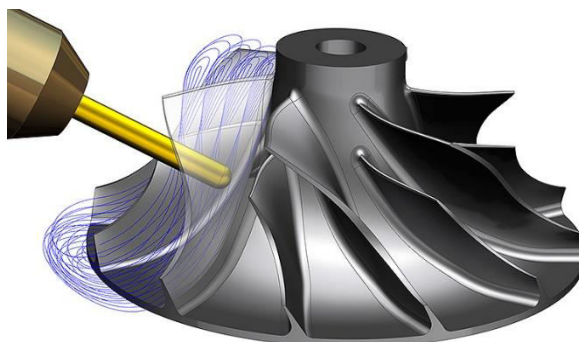
Plynulé 5-osové obrábanie sa vyvinulo z 5-stranového obrábania spojením moderných ovládacích systémov, aby umožnili nástroju dostať sa do ľubovoľnej polohy voči obrábanému povrchu. Výrobné procesy boli tak urýchlené, keďže výrobky stačí upnúť do stroja iba raz, a taktiež umožnili produkciu tvarovo zložitých povrchov a súčiastok.



Obr. 1.: Tvarovo zložité súčiastky vyrobené 5-osovou technológiou obrábania [4]

Dnešná výroba na 5-osových obrábacích strojoch prevláda najviac v leteckom priemysle, kde súčiastky nie sú prizmatické. 5-osové obrábanie sa tiež používa na výrobu foriem v zlievarenskom priemysle, implantáty a kĺbové náhrady v medicínskom priemysle a turbínové lopatky v energetickom priemysle. Na päťosových obrábacích strojoch sa vyrábajú i súčiastky, kde diery a tvarovo zložité prvky sú pod rôznymi uhlami a výroba takejto súčiastky by si vyžadovala niekoľko upnutí na bežnom 3-osovom stroji [3], [4], [5].

Naklápanie dovoľuje skrátenie vyloženia nástroja a tiež použitie kratších nástrojov. Zvolením kratších nástrojov môžeme obrábať vyššími rýchlosťami posuvov a vyššími otáčky vretena, čím sa môžu zlepšiť rezné podmienky. Kratšie nástroje sú menej namáhané vibráciami než je tomu u dlhých nástrojov, čo sa prejavuje na kvalite obrobenej plochy.



Obr. 2.: Návrh trajektórie nástroja (modré krivky) v CAM prostredí [23]

Výroba na 5-osovom stroji sa nezaobíde bez pokročilých CAM technológií (z angl. Computer Aided Machining – počítačom riadené obrábanie) [4].

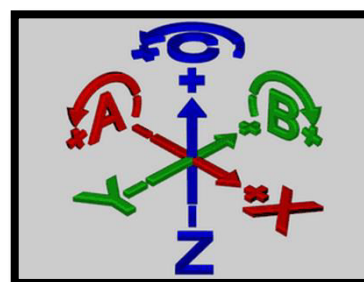
3.2. Pracovný priestor a riadiaci systém

Zo samotnej podstaty technológie je žiadúce, aby sa nástroj voči obrobku dokázal pohybovať plynulo všeobecným pohybom. Zložky všeobecného pohybu sú pohyb translačný a pohyb rotačný [6]. Pohyb nástroja v priestore je definovaný normálnym (karteziánskym) pravouhlým súradnicovým systémom, ktorého osi X, Y, Z sú orientované rovnobežne s vodiacimi plochami stroja. Súradnice nástroja pre translačný (lineárny) a rotačný pohyb, sú označované nasledovne [7]:

- translačný pohyb v osách X, Y, Z,
- rotačný pohyb okolo osí A, B, C,

Podľa noriem ISO platí nasledujúca skutočnosť pre usporiadanie osí, viď obr. 3 [4]:

- rotačná osa A je totožná s lineárnou osou X,
- rotačná osa B je totožná s lineárnou osou Y,
- rotačná osa C je totožná s lineárnou osou Z.



Obr. 3.: 3 osi translačné a 3 osi rotačné v súradnicovom systéme [22]

Pohyb nástroja v obrábacom stroji je obmedzený konštrukciou pojazdov osí. Súhrn všetkých bodov, v ktorých sa môže nachádzať špička nástroja v obrábacom stroji, sa nazýva pracovný priestor, resp. pracovný objem. Najvzdialenejšie body pracovného priestoru nazývame pracovná obálka [8].

Pre určenie polohy nástroja v normálnej súradnicovej sústave sú v pracovnom priestore definované vzťažné body:

- referenčný bod,
- nulový bod stroja,
- nulový bod obrobku.

Štandardnou výbavou dnešných riadiacich systémov CNC obrábacích strojov je transformácia súradníc, ktorá sa využíva pre uľahčenie práce so strojom pri prevádzke. Vďaka tejto možnosti je k dispozícii vytvorenie relatívnych súradnicových systémov, ktoré si užívateľ, resp. operátor stroja môže zvoliť podľa potreby a uváženia [1].

3.3. Požiadavky kladené na obrábacie stroje

Súčasný vývojový trend v konštruovaní obrábacích strojov smeruje najmä k multifunkčným strojom, na ktorých je možné vykonať celý rad technologických operácií pri jednom ustanovení a upnutí obrobku. Presadzujú sa metódy presného obrábania, vysokorýchlostného obrábania, suchého obrábania a rad ďalších náročných technologických metód, čo kladie na všetky časti obrábacieho stroja vysoké nároky, ktoré ovplyvňujú zmeny v klasickej koncepcii obrábacích strojov. Hlavný vplyv na kvalitu obrábacieho stroja je určená faktormi, viď obr. 4.



Obr. 4.: Vplyv hlavných faktorov na kvalitu obrábacieho stroja [1]

Príkladom týchto vplyvov je vývoj obrábacích strojov smerom k plno automatizovaným, bezobslužným, multifunkčným obrábacím centrá, ktoré sa vyznačujú vysokou presnosťou práce, veľkou produktivitou a celým radom adaptívnych kontrolných funkcií. Obrábacie centrá sú bezobslužné pracoviská umožňujúce vykonať mnoho technologických operácií na jedno upnutie obrobku a vyznačujú sa ďalej týmito vlastnosťami [1], [9],:

- vysoká tuhosť a presnosť stroja, dynamická a termická stabilita
- nastavenie optimálnej reznej rýchlosti – plynulá zmena otáčok i posuvov
- presné a bezvôľové uloženia a vedenia
- presné polohovanie
- pomocné zariadenia, kontrolné a meracie prístroje
- automatická výmena nástrojov a obrobkov
- uzavretie pracovného priestoru

3.4. Pořiadavky na konštrukciu

Medzi hlavné požiadavky na konštrukciu každého stroja patrí vysoká miera tuhosti. Tuhosť stroja môžeme rozdeliť do niekoľko skupín podľa druhu namáhania stroja na:

- statický tuhosť,
- dynamickú tuhosť,
- teplotnú tuhosť.

3.4.1. Statická tuhosť

Pri návrhu konštrukcie obrábacieho stroja je určujúcim hľadiskom veľkosť statického zaťaženia. Podľa charakteru statického zaťaženia rozlišujeme 4 druhy zaťaženia s odpovedajúcou tuhosťou, ktorými sú ťah, tlak, ohyb a krut. Statická tuhosť súčiastky je závislá na druhu namáhania daného materiálu.

Statický účinok síl môže byť spôsobený kombináciou vlastnej tiaže celého stroja, tiažou samotného obrobku a reznými silami. Tiaž od hmotnostných síl spoločne zapríčiňujú priehyby jednotlivých častí obrábacieho stroja. Preto pri návrhu stroja je nutné, aby sa počítalo s dostatočnou tuhosťou.

Celý stroj je pri návrhu prevedený pomocou MKP sústavy elementárnych pružín, ktoré sú navzájom sériovo a paralelne pospájané. Vďaka MKP analýze je možné určiť celkovú statickú tuhosť, resp. poddajnosť stroja.

3.4.2. Dynamická tuhosť

Obrábací proces prináša so sebou pohyb nástroja, resp. obrobku, zmenu otáčok a procesných síl. Všetky zmeny zaťaženia stroja v čase, akými sú rezné sily a sily od zrýchlení pohybujúcich sa hmôt, označujeme dynamické namáhanie, s ktorým je spojená dynamická tuhosť stroja, resp. odolnosť voči vibráciám.

Pojem vibrácie u obrábacích strojov označuje mechanické kmitanie alebo chvenie. Kmitanie obrábacieho stroja je veľmi nežiaducim javom, ktorý negatívne ovplyvňuje výslednú akosť povrchu, značne zvyšuje namáhanie súčastí, často až na medzu pevnosti materiálu, spôsobuje otrasy a hluk. Príčiny kmitania v obrábacom stroji (OS) popisuje tab. 3. [9]:

Tab. 3: Príčiny kmitania v obrábacích strojoch [9]

Vynútené			Samobudené		
rušivé sily zo základu	nevyváženosť, zábery zubov, nepresnosť lôží	rázy od zábery rezných britov	rezný proces (podmienky)	polohová väzba	regeneratívny efekt

3.4.3. Teplotná stabilita

Obrábacie stroje sú v prevádzke ovplyvňované zdrojmi tepla, ktoré sú príčinou nežiaducich deformácií spôsobené teplotnou dilatáciou jednotlivých uzlov stroja, akými sú guľôčkové skrutky, motory, ložiská atď. Teplotné vplyvy je možné rozdeliť do dvoch hlavných skupín, ako je to zobrazené v tab. 4.:

Tab. 4: Tepelné rušivé vplyvy [9]

Vnútorne		vonkajšie		
Pohony – straty	Obrábací proces	Teplota okolia	Tepelné žiarenie	Prúdenie vzduchu
<ul style="list-style-type: none"> • motory • ložiská • spojky • čerpadlá • mazanie • hydraulika • prevody a iné 	<ul style="list-style-type: none"> • nástroj • obrobok • triesky • chladenie 		<ul style="list-style-type: none"> • vykurovacie telesá • slnko 	

Teplotná dilatácia funkčných častí stroja spôsobuje pri výrobe nepresnosti, ktoré sú nežiaduce. Odvod tepla z teplotne namáhaných častí je žiaduci spolu so zachovaním stabilnej teploty celého stroja.

Neustále stúpajúce podmienky na presnosť obrábacích strojov kladú požiadavky na zvyšovanie teplotnej stability sofistikovanejším odvádzaním tepla. Problematika teplotnej tuhosti patrí k hlavným, doposiaľ neúplne doriešených problematik stavby obrábacích strojov [1], [9].

3.4.4. Uloženie stroja a topológia nosných sústav

Obrábací stroj musí byť uložený na pevnom podklade s vysokou presnosťou, ktorá sa pohybuje rádovo v jednotkách až desiatkach mikrónov. , ktorý zároveň tlmí vibrácie, ktoré sa šíria zo stroja do výrobnéj haly a naopak. Tuhé spojenie so zemou zvýši celkovú tuhosť stroja.

3.5. Kinematické štruktúry 5-osových obrábacích strojov

Konštrukčné prevedenia jednotlivých osí súhrne označujeme pod pojmom kinematická štruktúra. Rôzne kinematické štruktúry prinášajú so sebou výhody a nevýhody pri používaní frézovacieho stroja.

Tab. 5: Kinematické štruktúry č. 1. [10]

Konfigurácia osí v 5-osovom stroji			Konfigurácia osí v 5-osovom stroji		
Označenie osí	X, Y, Z, C, A		Označenie osí	X, Y, Z, B, A	
Indexovanie osí	0, 1, 2, 3, 4		Indexovanie osí	0, 1, 2, 3, 4	
Kinematická štruktúra			Kinematická štruktúra		
	Osi nástroja	Osi obrobku		Osi nástroja	Osi obrobku
NC osi	X, Y, Z, C, A	-	NC osi	X, Y, Z, B, A	-
Konfigurácia osí v 5-osovom stroji			Konfigurácia osí v 5-osovom stroji		
Označenie osí	X, Y, Z, C, A		Označenie osí	X, Y, Z, A, B	
Indexovanie osí	0, 1, 2, 3, 4		Indexovanie osí	0, 1, 2, 3, 4	
Kinematická štruktúra			Kinematická štruktúra		
	Osi nástroja	Osi obrobku		Osi nástroja	Osi obrobku
NC osi	X, Y, Z, C, A	-	NC osi	Z, A, B	X, Y

Tab. 5 ukazuje kinematické štruktúry 5-osových frézovacích strojov s univerzálnou hlavou pre , kde rotačné pohyby vykonáva iba nástroj. Častý pohyb veľkými hmotami pripievanými na pracovnom stole negatívne prispieva k nepresnosti výroby. Priradením rotačných osí v kinematickom reťazci nástroja sa problém minimalizuje. Kinematické štruktúry s rotačnými osami priradenými k obrobku sú zobrazené v tab. 6.

Tab. 6: Kinematické štruktůry č. 2. [10]

Konfigurácia osÍ v 5-osovom stroji			Konfigurácia osÍ v 5-osovom stroji		
Označenie osÍ	X, Y, Z, B, C		Označenie osÍ	X, Y, Z, A, B	
Indexovanie osÍ	0, 1, 2, 3, 4		Indexovanie osÍ	0, 1, 2, 3, 4	
Kinematická štruktůra			Kinematická štruktůra		
NC osÍ	Osi nástroja	Osi obrobku	NC osÍ	Osi nástroja	Osi obrobku
	Z, B	X, Y, C		Z, A	X, Y, B
Konfigurácia osÍ v 5-osovom stroji			Konfigurácia osÍ v 5-osovom stroji		
Označenie osÍ	X, Y, Z, B, A		Označenie osÍ	X, Y, Z, B, C	
Indexovanie osÍ	0, 1, 2, 3, 4		Indexovanie osÍ	0, 1, 2, 3, 4	
Kinematická štruktůra			Kinematická štruktůra		
NC osÍ	Osi nástroja	Osi obrobku	NC osÍ	Osi nástroja	Osi obrobku
	X, Z, B	Y, A		X, Y, Z	B, C

4. Kontrola 5-osových frézovacích strojov

Na finálnu kvalitu výrobku vplýva celý rad faktorov vo výrobnom procese. Medzi hlavné príčiny nedostatočnej kvality a zmätkovosti patria chyby výrobného stroja. Tieto chyby sa nedajú úplne eliminovať, aby bol stroj ideálne presný, no je potrebné ich udržiavať v daných medziach, t.j. toleranciách [1], [10].

Tab. 7: Faktory ovplyvňujúce presnosť výroby [1]

Stroj	Nástroj	Obrobok	Obsluha a výrobná technológia
<ul style="list-style-type: none"> • geometrická presnosť stroja • tuhosť – dynamická, statická • tepelné vplyvy • ustanovenie • mazanie 	<ul style="list-style-type: none"> • geometria • tuhosť – dynamická, statická • tepelná vodivosť 	<ul style="list-style-type: none"> • tvar • materiálové vady • upnutie obrobku 	<ul style="list-style-type: none"> • skúsenosti obsluhy • pracovný postup • pracovné podmienky • podmienky okolitého prostredia

4.1. Chyby presnosti obrábania

Slovný pojem chyba vyjadruje úsudok, že daný prvok nespĺňa určité požiadavky a je taktiež mimo akceptovateľnej hranice - tolerancie. Naopak pojem odchýlka vyjadruje čiastočné vyhovenie požiadavky a je preto akceptovateľná. Chyba presnosti obrábania je neprijateľná, spôsobuje škody v podobe neekonomickosti výroby a preto sa hľadajú riešenia pre ich minimalizáciu alebo dokonca úplné odstránenie. Chyby môžeme podľa výskytu rozlišovať na:

- náhodné,
- systematické.

Kombináciou statických i dynamických účinkov, teplotnou rozťažnosťou častí stroja vznikajú spoločne s geometrickou presnosťou stroja vznikajú chyby v procese obrábania. Každý posuv, lineárny či rotačný, je sprevádzaný chybou.

Náhodné chyby sú zapríčinené kombináciou viacerých faktorov. Nedá sa im predísť a majú Gaussovo normálne rozdelenie. Výskyt systémových chýb sa dá kontrolovať a zmenšiť chybu do tolerovaného rozsahu, aby sa v konečnom dôsledku zvýšila presnosť obrábania a tým i kvalita výroby [11].

Keďže nie je možné zabrániť výskytu náhodných chýb, je účelné zabraňovať systematicky vznikajúcim chybám. Môžeme ich odstrániť, resp. znížiť do tolerovanej hladiny nasledujúcimi spôsobmi:

- Mechanické odstránenie, tj. úprava, resp. výmena mechanizmov v stroji,
- Systémová kompenzácia chýb.

Pojem kompenzácia systémových chýb zahŕňa vyrovnanie chybovosti k tolerovaným medziam, čím sa zníži odchýlka geometrie. Dnešné 5-osové

obrábacie stroje majú možnosť kompenzovania chýb vo svojom riadiacom systéme. Systematickým odstraňovaním chýb sa zvyšuje výrobná presnosť stroja [11], [12].

4.2. Geometrická a volumetrická presnosť

4.2.1. Geometrická presnosť

Presnosť výroby nie je ovplyvňovaná len zaťažením, ale i geometrickou presnosťou funkčných častí stroja. Odchýlky od geometrickej presnosti súčastí mimo tolerované hodnoty nazývame geometrické chyby tvaru a polohy. Všetky funkčné časti v stroji boli vyrobené reálnymi postupmi a preto nie je možné, aby boli ideálne presné. Tvarové odchýlky spôsobujú určité vychýlenia a priamo vplývajú na presnosť kinematiky stroja, t. j. presnosť pohybu stroja. Keďže geometrické odchýlky súvisia priamo s kinematickou presnosťou, súhrnne ich môžeme označiť pod geometrickú presnosť stroja.

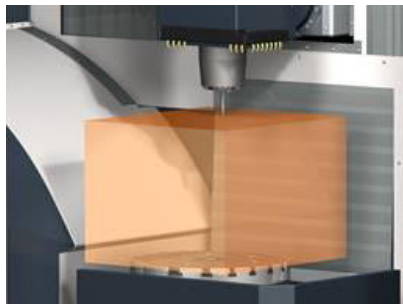
Tab. 8: Skúšky obrábacích strojov [1], [14]

Technické údaje a vlastnosti	Geometrická presnosť	Pri zaťažení	iné
<ul style="list-style-type: none"> • rozmery • zdvihy • otáčky a posuvy • príkon • hmotnosť 	<ul style="list-style-type: none"> • priamosť • rovnobežnosť • kolmosť • rovinnosť • súosovosť • čelné hádzanie • obvodové hádzanie • osová vôľa • osový pohyb 	<ul style="list-style-type: none"> • výkon • polohovanie • pracovná presnosť • výrobná presnosť 	<ul style="list-style-type: none"> • hluk • spoľahlivosť • chod naprázdno • dynamika • oteplenie • tuhosť • osvetlenie • upínacia sila

Chyby geometrickej presnosti vznikajú i nedokonalou montážou. Pri zakúpení stroja je dôležité, aby bol stroj dôkladne skontrolovaný. Po prevoze do výrobného podniku musí byť stroj nastavený do správnej polohy a do správneho chodu.

Do tejto kategórie chýb zaraďujeme aj chyby, ktoré nevznikajú pri zaťažení stroja. Rozoznávame ich ako geometrické chyby tvaru a polohy funkčných častí stroja, kinematické chyby stroja, ktoré vznikajú vzájomným pohybom dvoch a viacerých dielov stroja a volumetrické chyby stroja [1].

Obrábací stroj je kontrolovaný a udržiavaný, aby výroba na ňom bola efektívna. Preto sa pohyb, polohovateľnosť a opakovateľnosť strojných posuvov kontrolované. Nástroj v 5-osovom stroji sa často pohybuje po krivkových trajektóriách pri vyrábaní tvarovo komplexných súčiastok alebo obrábaní povrchov všeobecných tvarov. Pohyb je všeobecný, zložený z viacerých pohybov súčasne, lineárnych i rotačných. Kontrolovaním presnosti strojného pohybu zisťujeme geometrickú presnosť stroja, ktorá tak výrazne ovplyvňuje výrobný proces v päťosovom stroji.



Obr. 5.: Pracovní objem v obrábacom stroji [10]

Pohyb nástroja v pracovnom objeme je ovplyvňovaný odchýlkami, ktoré vznikajú nedokonalosťou funkčných častí stroja – tvarovými odchýlkami jedného prvku alebo kinematickou presnosťou dvoch a viacerých funkčných prvkov v stroji. Zhrnutím všetkých zložiek geometrickej presnosti v pracovnom objeme obrábacieho stroja nazývame objemová, resp. volumetrická presnosť.

4.2.2. Volumetrická presnosť

.Volumetrická presnosť poznateľne vplýva na obrábací proces v 5-osoovom stroji, kde je požadovaná vysoká presnosť a tolerance sú veľmi malé. Geometrické chyby sa môžu tak v jednotlivých osách sčítať a vytvoriť poznateľné nepresnosti, aj keď samostatne odmerané geometrické odchýlky sú v tolerovanom rozmedzí [13].

Metóda volumetrickej kompenzácie systémových chýb môže veľmi pomôcť k docieleniu vysokej presnosti 5-osoového stroja. Meracie zariadenia pracujú na úrovni mikrónov a vedia individuálne parametre odchýlok zaznamenať a následne ich priamo transformovať do riadiaceho systému stroja v podobe volumetrickej kompenzácie [14].

4.3. Meranie geometrickej presnosti 5-osoových obrábacích strojov

V nasledujúcich kapitolách sú popísané princípy merania geometrickej presnosti pomocou laserového interferometra a ballbaru, ktoré sa používajú na kompenzáciu volumetrických chýb [10]. Pre určenie geometrickej presnosti stroja sa používajú viaceré metódy. Sú to napr. merania [15] [16] [17]:

- presnosti polohovania,
- opakovateľnosti
- uhlových odchýlok,
- priamosti,
- rovnobežnosti a súosovosti,
- kolmosti a kruhovitosti,
- rovinnosti,
- rotačných osí,
- diagonálnych vzdialeností,

pričom definície a väčšina metodiky merania sú zhrnuté v medzinárodných normách ISO 230 a jej častiach.

Tab. 9: Meranie geometrickej presnosti strojov – technické prostriedky [1]

Mechanické	Optické	Elektronické
<ul style="list-style-type: none"> • úchylkomer • vodováhy • pravítka • uholníky • meracie tŕne (valcové) • meracie hranoly • etalony • pomôcky a prípravky 	<ul style="list-style-type: none"> • laserové interferometre • laser tracere a trackere • laserové tomografy 	<ul style="list-style-type: none"> • laserové interferometre • laser tracere a trackere • laserové tomografy • elektronické vodováhy • ballbar

4.4. Ballbar

V priemysle často používaný výraz ballbar pochádza z angličtiny. Ballbar je druh meracieho zariadenia tyčinkového tvaru s guľovitými zakončeniami. Spoločnosť Renishaw priviedla na trh s metrologickými prístrojmi svoj prvý ballbar systém QC10 v roku 1991, ktorý sa stal vo veľmi krátkom čase dobrou voľbou pre kontrolu geometrickej presnosti, keďže jeho používanie je relatívne jednoduché.

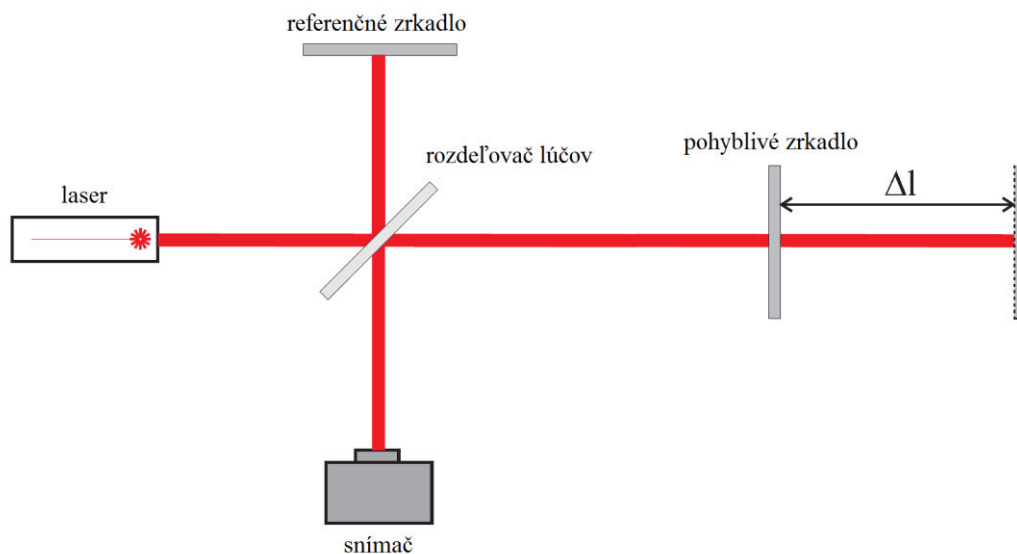


Obr. 6. Porovnanie modelov ballbar QC10 (vľavo) a QC20-W (vpravo) [10]

Súčasne firma Renishaw dodáva na trh prístroje QC20-W. Zariadenie dokáže zmerať a vyhodnotiť dynamické vplyvy na nástroj a presnosť pri obrábaní, čo s krátkym časom testovania stroja a nenáročnosťou ustanovenia a obsluhy umožňuje vyhodnotiť možnosti výroby na stroji alebo určiť aktuálny údržbový stav stroja. S použitím softwaru Ballbar 20 je možné testovať kruhovitosť a obvodové hádzanie v ose merania a meraním kolmosti rovín (testovaním kruhovej interpolácie, (viď kap.4.8 Test kruhovej interpolácie) určiť sféricosť, čím je možné kompenzovať volumetrické chyby v danom skúšanom pracovného objemu. Testovanie ballbarom je popísané normami ČSN ISO 230-4, ASME B5.54, ASME B5.57M, JIS B 6190-4 a GB/T 17421.4 [10].

4.5. Laserová interferometria

Od konca 19. stor. nastupovali meracie prístroje využívajúce interferenciu svetla. Zatiaľ čo sa technológia od tej doby naďalej zlepšovala, základné princípy tejto metódy zostali nezmenené. Meracia jednotka prístrojov používa veľmi malý a stabilný zdroj svetla o presnej vlnovej dĺžke. Meranie je založené na detekcii fázových rozdielov medzi dvomi lúčmi, ktoré sa skladajú v interferenčnom poli. Laserové zdroje svetla používajú veľmi malé a stabilné zdroje monochromatického svetla. Princíp laserovej interferometrie je zobrazený na obr. 7 [10], [18].



Obr. 7.: Princíp Michelsonovho interferometru [19]

Princíp relatívneho merania vzdialenosti, založený na použití Michelsonovho interferometru, využívajú systém Renishaw XL-80.

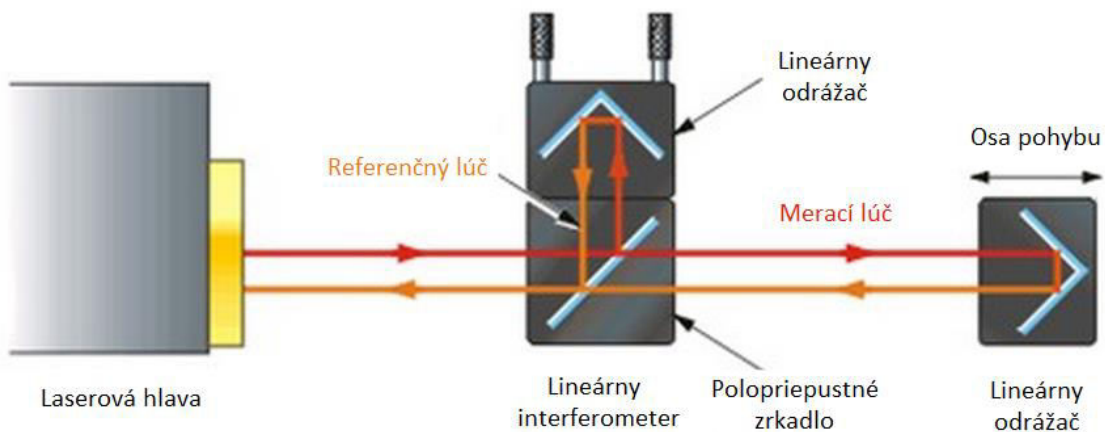
4.5.1. Laser interferometer XL-80

XL-80 nadväzuje na starší model spoločnosti Renishaw ML-10. Hlavnými časťami tohto systému sú laserová hlavica XL-80, kompenzátor vplyvu prostredia XC-80 so snímačmi okolitého prostredia, statív pre upevnenie laserovej hlavice, optika a prvky pre upevňovanie a ustanovovania optiky,

Zostavenie optických prvkov v stroji je kľúčové pre skúšku. Optika musí byť pripevnená do stroja (stôl alebo vreteno) dostatočne pevne. Skúšky geometrickej presnosti systémom XL-80 slúžia na meranie:

- lineárneho polohovania,
- uhlového polohovania,
- rovinnosti,
- priamosti,
- kolmosti a i.

Laserový lúč z hlavice XL-80 vstupuje do lineárneho interferometra, kde je rozdelený na dva. Jeden lúč (referenčný) je ďalej nasmerovaný do prvého reflektora, ktorý je upevnený na lineárnom interferometri (nad polopriepustným zrkadlom). Druhý lúč (merací) prechádza cez polopriepustné zrkadlo k druhému reflektormi. Oba lúče sú týmito reflektormi odrazené späť cez polopriepustné zrkadlo a do laserovej hlavice, kde obidva laserové lúče spolu interferujú. Výchyľky optiky pri nepresnom strojnom posuve spôsobia fázový posuv lúčov, ktorý je zaznamenaný a vyhodnotený systémom. Zostavenie meracie optiky a princíp cesty lúča je zobrazené na Obr. 8 [10].



Obr. 8.: Princíp lineárneho merania systémom Renishaw XL-80 [11]

4.5.2. Vplyv prostredia na presnosť interferometru

Výsledky merania interferometrom sú ovplyvňované prostredím, v ktorom sa laserový lúč šíri. Index lomu n je funkciou okolitého prostredia a závisí na teplote, tlaku a vlhkosti vzduchu. Pri premenlivých parametroch prostredia dochádza k vzniku nepresnosti meraní zmeny vlnovej dĺžky o 0,25 ppm pri [10]:

- zvýšenie teploty vzduchu o 0,26 °C
- zníženie tlaku vzduchu o 0,93 mbar
- zvýšenie relatívnej vlhkosti vzduchu o 29 % (pri 40 °C)

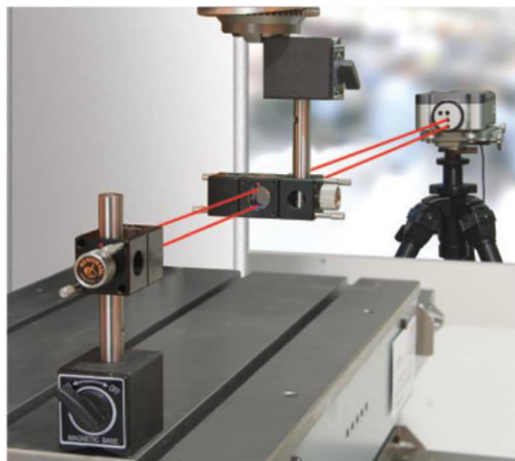
4.6. Meranie presnosti polohovania

Merania presnosti polohovania stroja sú popísané v normách ČSN ISO 230 alebo VDI / DQG 3441. Presnosťou polohovania sa zaoberajú časti normy ČSN ISO 230-2 a ČSN 230-6, Stanovenie presnosti a opakovateľnosti nastavenia polohy v číslicovo riadených osách, resp. Určenie presnosti polohovania na diagonálach pracovného priestoru. Norma ČSN ISO 230-2 sa zaoberá lineárnym meraním a norma ČSN ISO 230-6 popisuje meranie v celom pracovnom priestore, ktoré je označované ako meranie tzv. volumetrickej presnosti.

Skúška presnosti polohovania patrí k najjednoduchším metódam testovania geometrickej presnosti. Skúšky presnosti polohovania rozdeľujeme na:

- lineárne [16],
- diagonálne,
- krokové diagonálne [17].

Stroj by mal byť pred začatím skúšky zahriaty na prevádzkovú teplotu, aby sa podmienky skúšky podobali reálnym prevádzkovým podmienkam [15].



Obr. 9.: Skúška lineárneho polohovania systémom Renishaw XL80 [10]

4.7. Meranie priesečníku osí rotácie

Rotačný pohyb súčasne s lineárnym pohybom je pri 5-osovom obrábaní bežný pri obrábaní tvarovo zložitých plôch. Rotačným pohybom sa rozumie naklápanie obrobku alebo nástroja spolu so strojným posuvom. Volumetrická kompenzácia päťosového obrábacieho stroja môže byť vytvorená na základe merania priesečníku osí rotácie. V tejto metóde sa využíva prístroj Renishaw XC20-W a laser interferometer XL-80 na meranie uhlových chýb pri súčasnom otáčaní vretena, resp. stola (podľa kinematickej



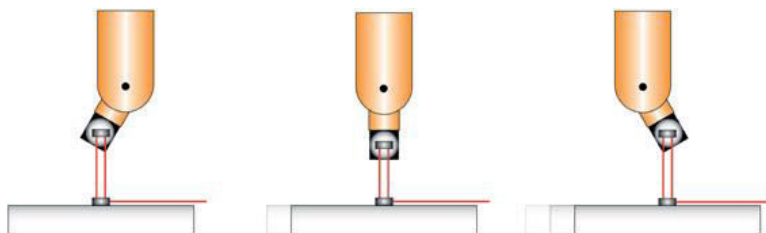
Obr. 11.: XC20-W [10]



Obr. 10.: XC20-W upevnené na vreteno 5-osového stroja [10]

štruktúry, vid' kap. 4.5) a strojným posuvom.

Zariadenie XC20-W je pripevnené do vretena so sklápacou osou alebo do otočného stola pre uskutočnenie merania priesečníku osí rotácie [10].

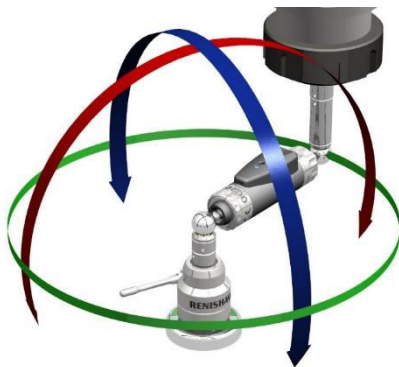


Obr. 12.: Translačný pohyb rotačnej osi v nástrojovej hlave [10]

4.8. Test kruhovej interpolácie

V päťosových obrábacích strojoch sa nástroj voči obrobku pohybuje všeobecným pohybom po krivke. Prichádza k skladaniu translačného pohybu s rotačným, čo so sebou prináša vznik ďalších nepresností v pracovnom objeme, ktoré je nutné kompenzovať.

U strojoch s 5 osami, kde sa môžu geometrické odchýlky objaviť pri lineárnych a zároveň aj pri rotačných osiach sa geometrické chyby môžu v jednotlivých osiach sčítať a vytvoriť poznateľné nepresnosti, aj keď samostatne odmerané geometrické odchýlky sú v tolerovanom rozmedzí. Táto skutočnosť môže v prípade veľmi malých výrobných tolerancií ohroziť rozmerovú presnosť a kvalitu povrchu.



Obr. 14.: Test kruhovej interpolácie v troch rovinách [10]



Obr. 13.: Pohyb ballbaru počas merania [10]

Použitím QC20-W a diagnostického softwaru Renishaw Ballbar 20 môžeme zmerať geometrickú presnosť obrábacieho stroja relatívne rýchlo a jednoducho, spracovať výsledky a skompenzovať volumetrické nepresnosti [10].

5. Vlastné meranie

V rámci bakalárskej práce boli vykonané skúšky geometrickej presnosti na stroji MCV Quick 754 firmy Kovosit MAS [19] Ústavu výrobných strojov, systémov a robotiky. Boli to:

- skúška rovnobežnosti stola, obvodového hádzania a kolmosti vretena
- test kruhovej interpolácie systémom ballbar QC20-W,
- geometrické skúšky polohovania laser interferometrom XL-80.

Protokoly a záznamy z meraní sa nachádzajú v prílohe.

Motiváciou pre meranie bolo pochopenie problematiky kontroly geometrickej presnosti a kompenzovaní geometrických a volumetrických chýb stroja.

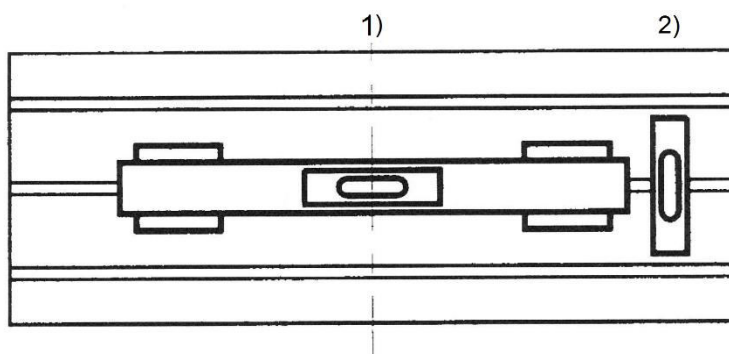
5.1. Meraný stroj

MCV 754 Quick

Pracovný rozsah 750 x 500 x 550 (X, Y, Z)

5.2. Postup vyrovnanie stola – meranie rovnobežnosti

Ako bolo popísané už v predchádzajúcich kapitolách, správne nastavené uloženie stroja zvyšuje jeho celkovú tuhosť a presnosť. Obrábok je upnutý do stola, ktorý musí byť rovnobežne so zemou, inak sa kvôli odchýlkam od rovnobežnosti zhoršuje kvalita obrábaného povrch. Skúška rovnobežnosti je popísaná normou ČSN ISO 230-2

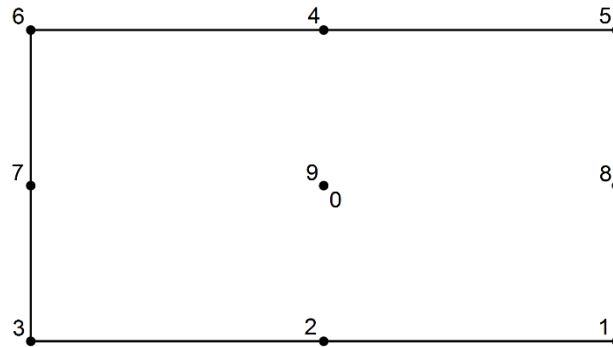


Obr. 15.: Umiestnenie vodováh na stole

Prvé meranie slúžilo na oboznámenie sa so základnými skúškami obrábacích strojov. Trojosový obrábací stroj MCV 754 bol počas merania rovnobežnosti nezaťažený, aby sa predišlo prípadným výchylkám. Maximálny možný dojazd môžeme zobrazit' v pomocnej testovacej rovine, na ktorej bolo vyznačených celkovo 9 bodov, kde počiatočný bod merania bol totožný s koncovým.

Deväť bodov roviny v pracovnom priestore bolo definovaných karteziánskymi súradnicami. Stôl sa postupne posúval z bodu 0 do bodu 9, pričom sa v každom bode pohyb zastav, aby mohla byť skontrolovaná rovnobežnosť vodováhami.

Zo stupnice na vodováhe boli odčítané hodnoty, ktoré predstavovali odchýlku od rovinnosti. Jeden dielik stupnice predstavoval 0,15 mm na 1 m meranej dĺžky.



Obr. 16.: Testovacia rovina – skúška rovnobežnosti stola

Príloha č. 1 obsahuje protokol z merania.

5.3. Postup merania ballbarom

Meranie geometrickej presnosti ballbarom umožňuje rýchle určenie rovinnosti a kolmosti meraných rovín. Zmeraním kolmosti 3 vzájomných rovín pracovného priestoru dokážeme určiť jeho sféricosť v testovanom obrábacom stroji.

Pre vykonanie testu kruhovej interpolácie bola najprv zvolená testovaná rovina (XY, YZ, ZX), potom vymedzenie testovaného priestoru, v ktorom sa má uskotočniť test. Ďalším krokom bolo určiť miesto, v ktorom sa meranie uskutoční. Malo by to byť také miesto, ktoré sa obrobky najčastejšie upínajú alebo miesto, kde sa najčastejšie obrába. Určíme testovaciu dĺžku podľa zámeru testu:

- a) veľké vzdialenosti a pomalý posuv pre určenie kolmosti a kruhovitosti,
- b) krátka vzdialenosť a rýchly posuv pre určenie dynamiky stroja (kontrola servo pohonov, reverzných špičiek a vibrácií) prístroja QC20-W je 100 mm a je možné k nemu pripojiť štandardné teleskopické tyčky o dĺžkach 50 mm, 150 mm a 300 mm.

Správne by sa mala odmerať teplota stroja. Ideálnym spôsobom je merať teplotu stroja v niekoľkých uzlových bodoch a namerané hodnoty spriemerovať. Po kontrole a nahratí G-kódu z programu Ballbar 20 do obrábacieho stroja bol spustený test. Po relatívne krátkom čase sa namerané dáta z QC20-W spracujú v programe Ballbar 20. Tento postup sme zopakovali aj pre ďalšie dve roviny.

Získané dáta sú spracované softwarom Renishaw Ballbar 20 a výsledky sú vyhodnotené podľa normy ISO 230-6.

Príloha č.2 obsahuje záznam výsledkov testu kruhovitosti vretena i výsledkov testu kruhovej interpolácie spolu s volumetrickou analýzou.

5.4. Meranie presnosti polohovania a opakovateľnosti

Pomocou laser interferometrického systému Renishaw XL-80 boli navrhnuté a uskutočnené merania v osách X, Y, Z na obrábacom stroji MCV 754 Quick. Výsledky meraní boli spracované pomocou programu Renishaw XCal-View podľa normy ISO 230-2.

Merania boli zamerané na zistenie vplyvu kompenzovania chýb na geometrickú presnosť stroja. V jednotlivých smeroch X, Y boli namerané odchýlky polohy a v programe XCal-View navrhnutá kompenzácia týchto osí.

Meranie v ose Z sa zopakovalo celkovo štyrikrát, aby bolo možné porovnať medzi sebou vplyv zapnutých, resp. vypnutých geometrických a volumetrických kompenzácií.

Príloha č. 3 obsahuje záznam výsledkov z merania.

6. Zhrnutie výsledkov merania

6.1. Výsledky merania rovnobežnosti stola

Tab. 10.: Výsledky merania rovnobežnosti stola

(0,15/1000)				(0,02/1000)			
bod	smer	1.meranie	2.meranie	bod	smer	3.meranie	4.meranie
0	x	-0,08	-0,08	0			
	y	+0,08	+0,08				
1	x	-0,15	-0,15	1			
	y	+0,08	+0,08				
2	x	+0,08	+0,08	2			
	y	+0,15	+0,15				
3	x	0	0	3			
	y	+0,15	+0,15				
4	x	0	0	4			
	y	+0,15	+0,15				
5	x	-0,08	-0,08	5			
	y	+0,15	+0,15				
6	x	+0,08	+0,08	6			
	y	+0,15	+0,15				
7	x	+0,08	+0,08	7	x	+0,01	+0,01
	y	+0,04	+0,08		y	+0,02	+0,02
8	x	-0,04	-0,08	8	x	-0,01	-0,01
	y	+0,12	+0,08		y	+0,01	+0,01
9	x	0	0	9	x	0	0
	y	+0,08	+0,08		y	+0,02	+0,02

Z nameraných hodnôt vyplýva, že všetky odchýlky od rovnobežnosti v bodoch 0-9 sú v tolerovaných medziach. Pri meraní rovnobežnosti v bodoch 7 a 8 sme museli použiť presnejšiu vodováhu (0,02/1000), keďže pôvodná vodováha (0,15/1000) nebola dostatočne presná v danej časti testovacej roviny. Presnosť vodováh bola o rád vyššia, než namerané hodnoty a preto je možné prehlásiť, že stůl bol dostatočne rovnobežný, ako to uvádza výrobca stroja.

6.2. Výsledky merania obvodového hádzania

Tab. 11: Výsledky merania obvodového hádzania

stotinný (0,01)			tisícinný (0,001)		
bod	smer	1.meranie	bod	smer	2.meranie
A	CV	0,0025	A	CV	-
	CCV	0		CCV	-
B	CV	0,01	B	CV	-
	CCV	0,01		CCV	-

Z nameraných hodnôt vyplýva, že odchýlka v meraných bodoch A, B bola v tolerovanom rozmedzí, ako to deklaroval výrobca. Pre kontrolu bol použitý i tisícinný odchýlkomer, avšak pre jeho zlý stav, predovšetkým zlú citlivosť merania, boli výsledky z merania týmto úchylkomerom zamietnuté.

7. Záver

Cieľom tejto bakalárskej práce bola rešeršná štúdia stavby a kontroly päťosových obrábacích strojov. Pod dohľadom vedúceho bakalárskej práce sa uskutočnili merania geometrickej presnosti polohovania na stroji MCV 754 Quick.

Práca je rozdelená na tri hlavné časti. Kapitola č. 3 je popisuje problematiku návrhu a konštrukcie päťosových obrábacích centier. Sú tu zhrnuté poznatky o základných kinematických štruktúrach 5-osových strojov. Rešerš bola vypracovaná na základe dostupnej literatúry, ktorá je uvedená v Zozname použitej literatúry.

Kapitola č. 4 je rešeršou na tému kontrolovanie presnosti strojov a bola vypracovaná pomocou firemnej literatúry firmy Renishaw a ďalších dostupných elektronických článkov z odborných časopisov, ktoré slúžili ako sekundárny zdroj informácií. Popísané metódy vybraných meraní pomocou laser interferometra a systému ballbar patria k najmodernejším metódam, ktoré sa dnes uplatňujú pri kontrolovaní obrábacích strojov. Poskytujú vysokú presnosť meraných veličín. Kompenzovaním odmeraných chýb týmito prístrojmi môžeme doceliť žiadané zvýšenie presnosti obrábacieho stroja. Na trhu s prístrojmi určených na meranie geometrickej presnosti sa nachádzajú i prístroje typu laser tracker a laser tracer. Používané sú tiež nástrojové i obrobkové sondy s päťosovými hlavicami. Príkladom je napríklad sonda Revo od Renishaw. Problematika týchto prístrojov a kompenzovaniu volumetrických chýb by mohla byť spracovaná v diplomovej práci nadväzujúceho štúdia.

Pri vyberaní nového päťosového stroja by si mal nakupujúci dôkladne vybrať taký systém, ktorý poskytuje volumetrickú kompenzáciu v takej miere, aby mohol byť potenciál päťosového obrábacieho stroja využitý naplno.

Cieľom merania presnosti polohovania v ose vretena Z bolo zistiť, aký vplyv majú geometrické a volumetrické kompenzácie na presnosť polohovania. Celkovo štyrikrát bolo vykonané meranie z rovnakého nastavenia laser interferometrom za rovnakých podmienok, aby bolo možné porovnať výslednú presnosť polohovania s 1) vykompenzovaným strojom, 2) zapnutou kompenzáciou objemových chýb, vypnutou kompenzáciou geometrických chýb, 3) vypnutou kompenzáciou objemových i geometrických chýb a 4) vypnutou kompenzáciou objemových chýb a zapnutou kompenzáciou geometrických chýb stroja MCV 754 Quick. Výsledky boli spracované v programe XCal-View.

Zoznam použitej literatúry

- [1] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, 2014, 684 s. : il. ISBN 9788026067801.
- [2] *Satellite* [online]. 2015 [cit. 2015-04-25]. Dostupné také <http://www.satellitemodels.com/moreinfo/what-does-5-axis-mean/>
- [3] *Mazak Europe* [online]. 2015 [cit. 2015-04-25]. Dostupné také <https://www.mazakeu.com/>
- [4] MAZAKAS, Ann. Simplified 5-axis Machining. Aerospace Manufacturing and Design [online]. 2011 [cit. 2015-05-16]. Dostupné také z: <http://www.onlineamd.com/FileUploads/file/WhitePaper-Simplified5AxisMachining.pdf>
- [5] Makino [online]. 2015 [cit. 2015-05-8]. Dostupné také z: <http://www.makino.cc>
- [6] PŘIKRYL, Karel. *Kinematika. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM* : vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 142 s. : il. ISBN 9788021436794.
- [7] YANG, Jixiang a Yusuf ALTINTAS. Generalized kinematics of five-axis serial machines with non-singular tool path generation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2013, **75**(12): 119-132 [cit. 2015-04-29]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2013.09.002. ISSN 08906955. Dostupné také <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0890695513001429>
- [8] Desktop CNC Milling *Machines and Routers. Data Wales Index* [online]. 2007 [cit. 2015-05-02]. Dostupné také z: http://www.data-wales.co.uk/cnc_mactype.htm
- [9] BORSKÝ, Václav. *Základy stavby obráběcích strojů. Vyd. 2., přeprac.* Brno: VUT, 1991, 214 s. : il. tabulky, grafy. ISBN 8021403616.
- [10] Renishaw plc [online]. 2015 [cit. 2015-04-25]. Dostupné také z: <http://renishaw.cz/cs/renishaw-zvysovani-efektivnosti-vyroby-a-zdravotni-pece> 1030
- [11] RAMESH, R, M.A MANNAN a A.N POO. Error compensation in machine tool — a review: *Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors*. b.r., : 1235-1256. DOI: 10.1016/S0890-6955(00)00009-2. Dostupné ta z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0890695500000092>

- [12] 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, 2002, 13(5): 37-389 [cit. 2015-05-9]. DOI: 10.1023/A:1019988710701. ISSN 09565515. Dostupné také z: <http://link.springer.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1023/A%3A1019988710701>
- [13] HE, Zhenya, *Jianzhong FU, Liangchi ZHANG a Xinhua YAO*. A new error measurement method to identify all six error parameters of a rotational axis of *machine tool*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online Elsevier Ltd, 2015, 88(1): 1-8 [cit. 2015-05-02]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2014.07.009. ISSN 08906955. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0890695514001096>
- [14] WANG, Charles. *What is 3D volumetric positioning accuracy and how to define and measure it*. In: Optodyne, Inc. [online] 2003 [cit. 2015-05-17]. Dostupné také z: <http://www.optodyne.com/opnew5/TecArt/tech16.pdf>
- [15] ČSN ISO 230-1: *Zásady zkoušek obráběcíÝh strojů - Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacíÝh podmínek obrábění*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [16] ČSN ISO 230-2: *Zásady zkoušek obráběcíÝh strojů – Část 2: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslícově řízených osách*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [17] ČSN ISO 230-6: *Zásady zkoušek obráběcíÝh strojů – Část 6: Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn (Zkouška diagonálního přestavení)*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [18] *Interferometry a vlastnosti laserového záření* [online]. 2012, s. 7 [cit. 2015-04-28]. Dostupné také z: http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP_03.pdf
- [19] *Kovosvit MAS* [online]. 2015 [cit. 2015-04-25]. Dostupné také z: <http://www.kovosvit.cz>

Zoznam obrázkov

<i>Obr. 1.: Tvarovo zložitá súčiastka vyrobená 5-osovou technológiou obrábania [4]</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2.: Návrh trajektórie nástroja (modré krivky) v CAM prostredí [23]</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 3.: 3 osi translačné a 3 osi rotačné v súradnicovom systéme [22]</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 4.: Vplyv hlavných faktorov na kvalitu obrábacieho stroja [1].....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 5.: Pracovný objem v obrábacom stroji [10]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 6. Porovnanie modelov ballbar QC10 (vľavo) a QC20-W (vpravo) [10]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 7.: Princíp Michelsonovho interferometru [19]</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 8.: Princíp lineárneho merania systémom Renishaw XL-80 [11].....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 9.: Skúška lineárneho polohovania systémom Renishaw XL80 [10].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 10.: XC20-W upevnené na vreteno 5-osového stroja [10].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 11.: XC20-W [10]</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 12.: Translačný pohyb rotačnej osi v nástrojovej hlave [10]</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 13.: Pohyb ballbaru počas merania [10]</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 14.: Test kruhovej interpolácie v troch rovinách [10].....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 15.: Umiestnenie vodováh na stole</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 16.: Testovacia rovina – skúška rovnobežnosti stola</i>	<i>30</i>

Zoznam tabuliek

<i>Tab. 1: Rozdelenie CNC strojov do kategórií [1]</i>	<i>13</i>
<i>Tab. 2: Hlavné výhody a nevýhody 5-osových strojov [3]</i>	<i>14</i>
<i>Tab. 3: Príčiny kmitania v obrábacích strojoch [9]</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 4: Tepelné rušivé vplyvy [9]</i>	<i>18</i>
<i>Tab. 5: Kinematické štruktúry č. 1. [10]</i>	<i>19</i>
<i>Tab. 6: Kinematické štruktúry č. 2. [10]</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 7: Faktory ovplyvňujúce presnosť výroby [1]</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 8: Skúšky obrábacích strojov [1], [14]</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 9: Meranie geometrickej presnosti strojov – technické prostriedky [1]</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 10.: Výsledky merania rovnobežnosti stola</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 11: Výsledky merania obvodového hádzania</i>	<i>32</i>

Zoznam príloh

Príloha č. 1 – Protokol merania geometrickej presnosti na stroji MCV 754 Quick
Príloha č. 2 – Výsledky merania z testu kruhovej interpolácie
Príloha č. 3 – Výsledky merania presnosti polohovania laserovým interferometrom
CD – Dáta z meraní

Prílohy

1. Všeobecne

1. Počas merania geometrickej presnosti obrábacieho stroja MCV 754 Quick boli chyby geometrickej presnosti stroja už vykompenzované.
2. Skúšky geometrickej presnosti boli vykonané so súladom normy ISO 230.
3. Všetky namerané hodnoty sú v *mm*

Pracovný stôl

Upínacia plocha stola	mm	1000 x 500
Maximálne zaťaženie stola	kg	400

Pracovný rozsah stroja

X – osa	mm	754
Y – osa	mm	500
Z – osa	mm	550

Vreteno

Max. otáčky vretena	ot./min	10000
Kužeľová dutina vretena	-	ISO 40

Rozmery stroja

Dĺžka x šírka x výška	mm	2590 x 2320 x 2560
Váha	kg	4000

2. Nástroje na meranie

Strojárska libela (vodováha), číselníkový odchýlkomer, *Ballbar*, mostík, trň



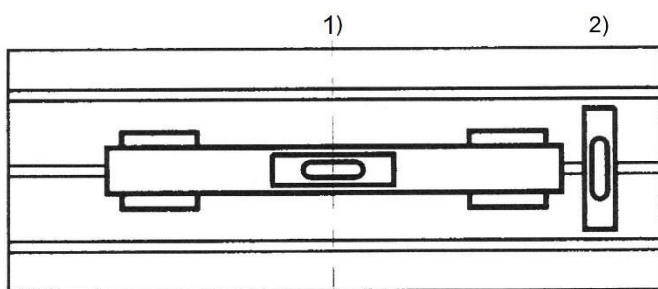
Obr. 2.: Vodováha



Obr. 1.: Číselníkový odchýlkomer

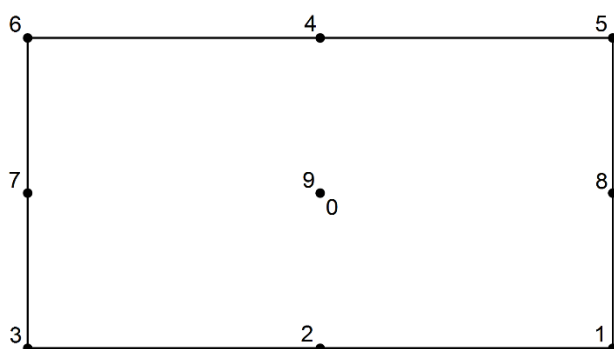
3. Vyrovnanie stroja

Vyrovnanie stroja vo vodorovnej rovine



1) na pracovný stôl položíme mostík a naň vodováhu. Kontroluje sa odchýlka od rovinnosti stola v smere osi x.

2) na pracovný stôl položíme vodováhu. Kontroluje sa odchýlka od rovinnosti stola v smere osi y.



3) odčítajú sa odchýlky od rovinnosti stola v kontrolných bodoch (0 až 9) meranej roviny pre smer x a y.

Súradnice zvolených bodov počas merania:

bod	x	y
0	[377,1 ; 200,1]	
1	[-0,2 ; 400,2]	
2	[754,2 ; 400,2]	
3	[377,1 ; 400,2]	
4	[377,1 ; -0,2]	
5	[-0,2 ; -0,2]	
6	[754,2 ; -0,2]	
7	[754,2 ; 200,1]	
8	[-0,2 ; 200,1]	
9	[377,1 ; 200,1]	

Použitá vodováha (presnosť):

- (0,15/1000) pre určenie odchýlky v smeroch x a y
- (0,02/1000) pre kontrolu nameraných odchýlok na priamke $\overline{7,9,8}$

Pozn.: Meradlá boli dostatočne presné; presnosť merania bola o rád vyššia, než maximálna dovolená odchýlka od rovinnosti v jednom smere.

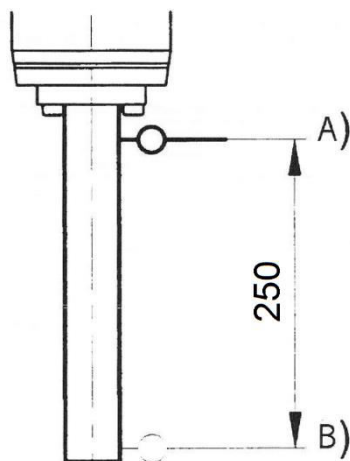
Výsledky:

(0,15/1000)				(0,02/1000)			
bod	smer	1.meranie	2.meranie	bod	smer	3.meranie	4.meranie
0	x	-0,08	-0,08	0			
	y	+0,08	+0,08				
1	x	-0,15	-0,15				
	y	+0,08	+0,08				
2	x	+0,08	+0,08				
	y	+0,15	+0,15				
3	x	0	0				
	y	+0,15	+0,15				
4	x	0	0				
	y	+0,15	+0,15				
5	x	-0,08	-0,08				
	y	+0,15	+0,15				
6	x	+0,08	+0,08				
	y	+0,15	+0,15				
7	x	+0,08	+0,08	7	x	+0,01	+0,01
	y	+0,04	+0,08		y	+0,02	+0,02
8	x	-0,04	-0,08	8	x	-0,01	-0,01
	y	+0,12	+0,08		y	+0,01	+0,01
9	x	0	0	9	x	0	0
	y	+0,08	+0,08		y	+0,02	+0,02

Pozn.:

- Výsledky 1. a 2. merania sa nezhodovali kvôli zlej citlivosti vodováhy (0,15/1000). Prekontrolovaním presnejšou vodováhou (0,02/1000) sa zistili presnejšie odchýlky od rovinnosti na priamke $\overline{7,9,8}$
- Všetky namerané odchýlky boli v tolerancii.

4. Meranie obvodového hádzania vnútorného kužeľa vretena



- 1) Pripevníme trň do vretena; trň musí mať dostatočnú dĺžku, aby mohla byť skúška platná (podmienky stanovuje výrobca stroja).
- 2) Číselníkový odchýlkomer pripevníme na vreteno
- 3) V bodoch A) a B) zmeriame odchýlky pomalým plynulým otáčaním vretena okolo svojej osi v min. rozsahu dvoch otáčok.

Súradnice bodov A a B (nulová hladina osi Z je povrch stola)

bod	z'	z
A	[0]	[-372,2]
B	[260,4]	[-111,8]

Použitie číselníkových odchýlkomery:

- stotínový (0,01)
- tisícínový (0,001); starý, problémy s citlivosťou

Pozn.:

- Výrobca deklaroval meranú dĺžku $L = 300 \text{ mm}$. Skúška bola vykonaná na dĺžke $L = 250 \text{ mm}$.
- Bol použitý číselníkový odchýlkomer s presnosťou $0,01 \text{ mm}$; tolerancia obvodového hádzania $0,01 \text{ mm}$. Nebola splnená podmienka 10-násobnej presnosti voči tolerancii.

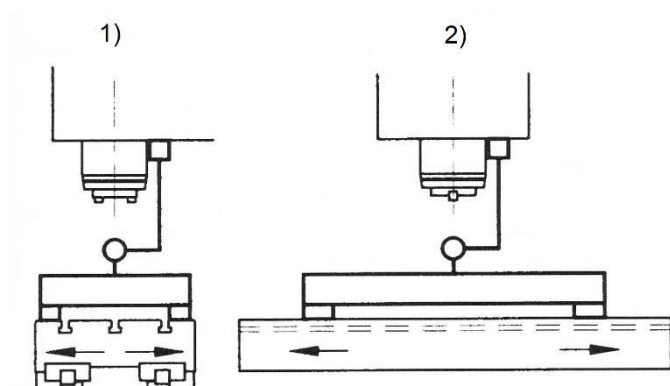
Výsledky:

stotínový (0,01)			tisícínový (0,001)		
bod	smer	1.meranie	bod	smer	2.meranie
A	CV	0,0025	A	CV	-
	CCV	0		CCV	-
B	CV	0,01	B	CV	-
	CCV	0,01		CCV	-

Pozn.:

- medzná odchýlka: 0,03 mm
- namerané hodnoty sú v tolerancii
- tisícinový odchýlkomer v zlom stave; zlá citlivosť; výsledky neplatné

5. Meranie rovnobežnosti pohybu v osách X a Y s plochou stola



- 1) meranie rovnobežnosti pohybu v smere y
2) Meranie rovnobežnosti pohybu v smere x

Použité číselníkové úchylkomer:

- stotinový (0,01)
- tisícinový (0,001); starý, problémy s citlivosťou

Pozn.:

- Číselníkový odchýlkomer sa pripevní na vreteno stroja. Nastaví sa tak, aby dotyk odchýlkomeru nebol úplne kolmý, ale približne pod 45° uhlom. Použitím pravítka sa zaisťí hladný a rovný povrch, ktorý slúži ako základňa pre určovanie chýb rovnobežnosti pohybu.

Výsledky

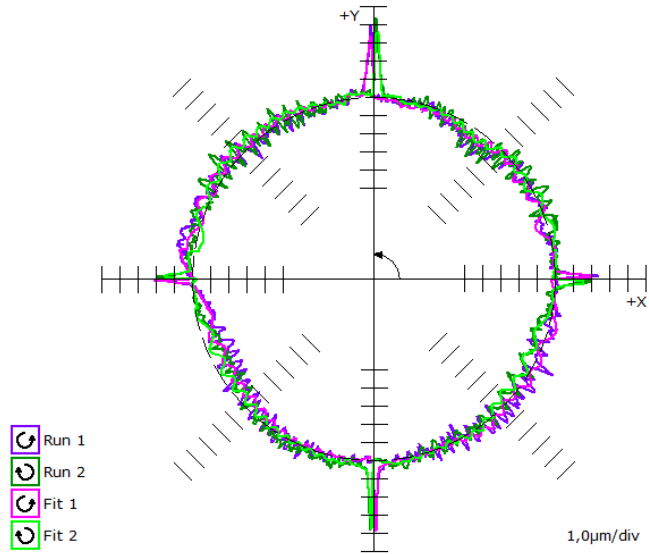
stotinový (0,01)	
smer	odchýlka
x	0,005
y	0,005

Pozn.:

- medzná odchýlka v smere x: 0,025 mm
- medzná odchýlka v smere y: 0,020 mm
- namerané hodnoty sú v tolerancii.
- nebol použitý odchýlkomer s 10-násobnou vyššou presnosťou voči tolerancii, ale výsledky je možné považovať za platné, keďže sa počas merania nevyskytli problémy s citlivosťou a odčítavaním hodnôt.

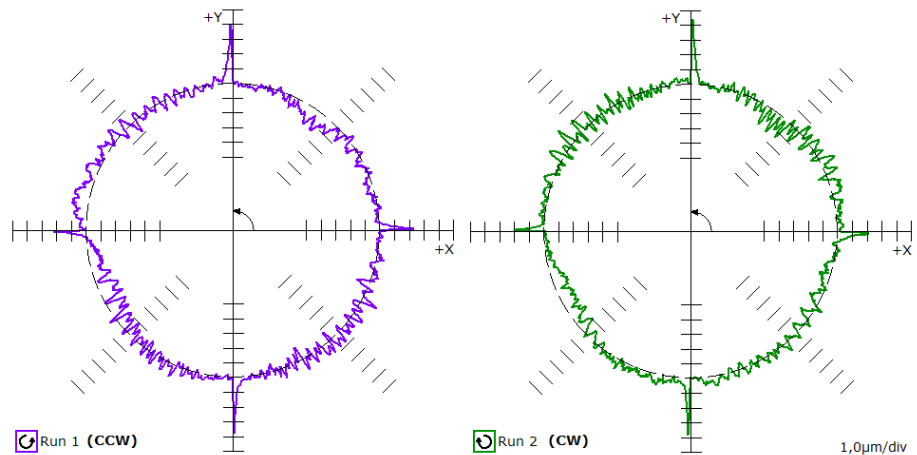
1. Rovina XY

Backlash (µm)	
X	▶ -0,4 ◀ -0,3
Y	▲ 0,4 ▼ 0,1
Reversal spikes (µm)	
X	▶ 1,9 ◀ 1,6
Y	▲ 3,4 ▼ 3,1
Lateral play (µm)	
X	▶ -0,6 ◀ 0,6
Y	▲ -0,1 ▼ 0,5
Cyclic error (µm)	
X	↑ 0,6 ↓ 0,7
Y	↑ 0,5 ↓ 0,5
Other features	
Servo mismatch	0,01ms
Squareness	3,0µm/m
Straightness X	1,0µm
Straightness Y	-0,3µm
Scaling error X	4,5ppm
Scaling error Y	5,6ppm
Positional tolerance	5,8µm
Best fit radius	150,0008mm
Circularity	6,0µm



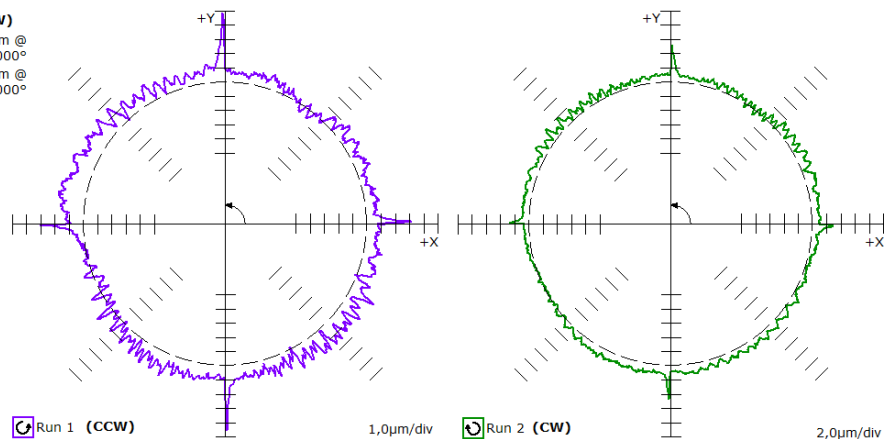
Obr. 1.: Test kruhovej interpolácie v rovine XY, 360°, 150 mm

Circular deviation	(CCW)	(CW)
Value	5,6µm	5,9µm
Test parameters		
Radius	150,0000mm	
Sample rate	76,923Hz	
Feedrate	3000,0mm/min	
Plane under test	XY	
Test position	0°	
Start angle	0°	
End angle	360°	
Overshoot angle	180°	

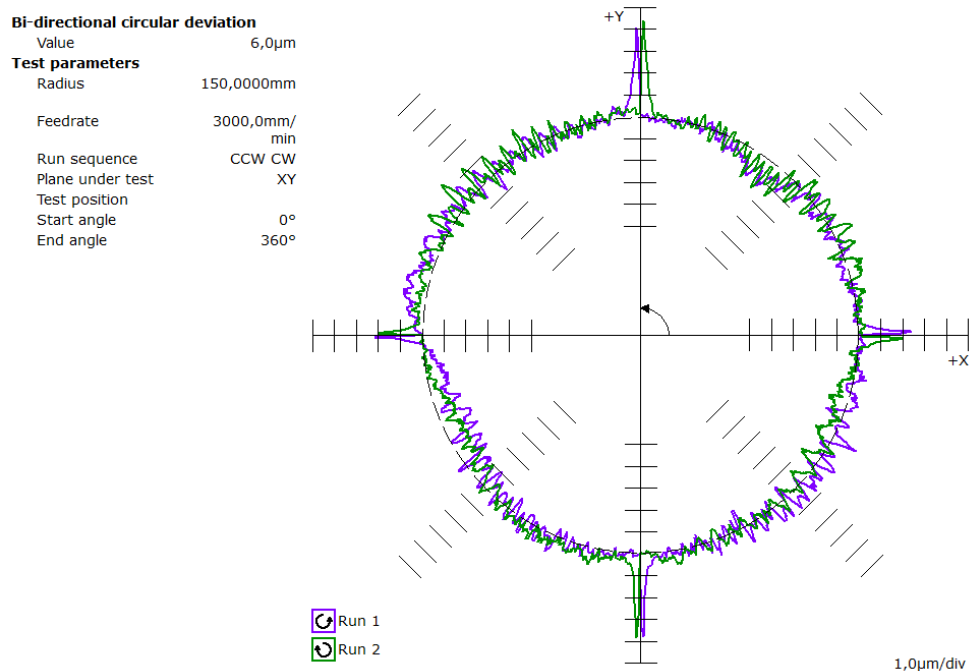


Obr. 2.: Kruhovitost' v rovine XY, vľavo v smere HR, vpravo v protismere HR, ISO 230-4

Radial deviation	(CCW)	(CW)
Maximum deviation	4,9µm @ 90,90000°	5,2µm @ 89,40000°
Minimum deviation	-0,7µm @ 207,90000°	-0,8µm @ 53,20000°
Test parameters		
Radius	150,0000mm	
Sample rate	76,923Hz	
Feedrate	3000,0mm/min	
Plane under test	XY	
Test position	0°	
Start angle	0°	
End angle	360°	
Overshoot angle	180°	



Obr. 3.: Radiálna odchýlka v rovine XY, vľavo v smere HR, vpravo v protismere HR, ISO 230-4



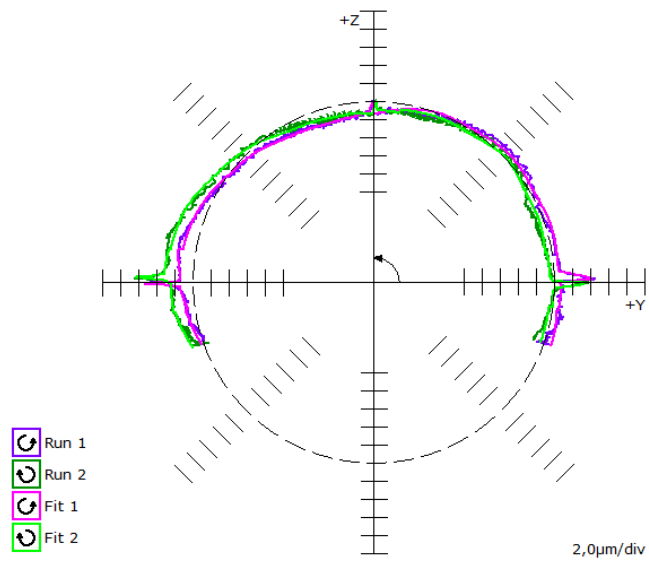
Obr. 4.: Obojstranná odchýlka od kruhovitosti v rovine XY, ISO 230-4

Error	Magnitude		Independent circularity	Ranking
Backlash X	▶ -0,4	◀ -0,3 μ m	0,4 μ m (4%)	(8)
Backlash Y	▲ 0,4	▼ 0,1 μ m	0,4 μ m (5%)	(7)
Reversal spikes X	▶ 1,9	◀ 1,6 μ m	1,9 μ m (19%)	(2)
Reversal spikes Y	▲ 3,4	▼ 3,1 μ m	3,4 μ m (36%)	(1)
Lateral play X	▶ -0,6	◀ 0,6 μ m	0,3 μ m (3%)	(9)
Lateral play Y	▲ -0,1	▼ 0,5 μ m	0,3 μ m (3%)	(11)
Cyclic error X	↑ 0,6	↓ 0,7 μ m	0,7 μ m (8%)	(3)
Cyclic error Y	↑ 0,5	↓ 0,5 μ m	0,5 μ m (5%)	(5)
Servo mismatch	0,01ms		0,3 μ m (3%)	(10)
Squareness	3,0 μ m/m		0,4 μ m (5%)	(6)
Straightness X	1,0 μ m		0,5 μ m (5%)	(4)
Straightness Y	-0,3 μ m		0,2 μ m (2%)	(13)
Scaling mismatch	-0,3 μ m		0,2 μ m (2%)	(12)
Scaling error X	4,5ppm			
Scaling error Y	5,6ppm			
Cyclic pitch X	10,0000mm			
Cyclic pitch Y	40,0000mm			
Calculated feedrate	2995,8mm/min			
Centre offset X	2,7 μ m			
Centre offset Y	1,8 μ m			
Positional tolerance	5,8 μ m			
Best fit radius	150,0008mm			
Circularity	6,0 μ m			

Obr. 5.: Výsledné chyby v rovine XY

2. Rovina YZ

Backlash (μm)		
Y	▶ 0,5	◀ 0,4
Z	▲ 0,2	
Reversal spikes (μm)		
Y	▶ 3,5	◀ 3,6
Z	▲ 1,1	
Lateral play (μm)		
Y	▶ -0,3	◀ -0,2
Z	▲ -0,3	▼ 0,2
Cyclic error (μm)		
Y	↑ 0,2	↓ 0,3
Z	↑ 0,4	↓ 0,4
Other features		
Servo mismatch	-0,01ms	
Squareness	6,6 $\mu\text{m}/\text{m}$	
<hr/>		
Best fit radius	149,9999mm	
Circularity	8,4 μm	

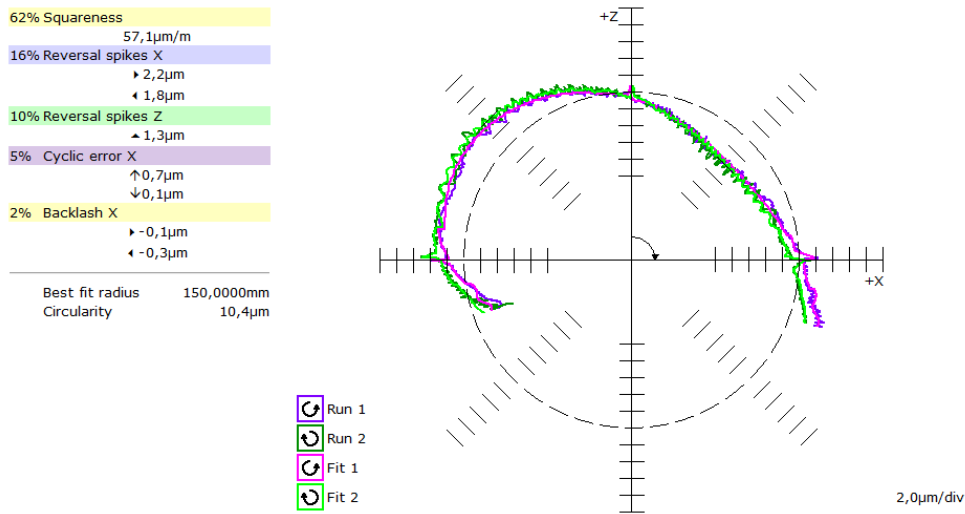


Obr. 6.: Test kruhovej interpolácie v rovine YZ, 220°, 150 mm

Error	Magnitude		Independent circularity		Ranking
Backlash Y	▶ 0,5	◀ 0,4 μm	0,5 μm	(6%)	(4)
Backlash Z	▲ 0,2		0,2 μm	(2%)	(9)
Reversal spikes Y	▶ 3,5	◀ 3,6 μm	3,6 μm	(47%)	(1)
Reversal spikes Z	▲ 1,1		1,1 μm	(14%)	(2)
Lateral play Y	▶ -0,3	◀ -0,2 μm	0,3 μm	(4%)	(6)
Lateral play Z	▲ -0,3	▼ 0,2 μm	0,2 μm	(2%)	(10)
Cyclic error Y	↑ 0,2	↓ 0,3 μm	0,2 μm	(3%)	(8)
Cyclic error Z	↑ 0,4	↓ 0,4 μm	0,4 μm	(5%)	(5)
Servo mismatch	-0,01ms		0,3 μm	(3%)	(7)
Squareness	6,6 $\mu\text{m}/\text{m}$		1,0 μm	(13%)	(3)
Cyclic pitch Y	45,0000mm				
Cyclic pitch Z	50,8000mm				
Calculated feedrate	2985,1mm/min				
Centre offset Y	-0,1 μm				
Centre offset Z	2,6 μm				
Best fit radius	149,9999mm				
Circularity	8,4 μm				

Obr. 7.: Výsledné chyby v rovine YZ

3. Rovina ZX

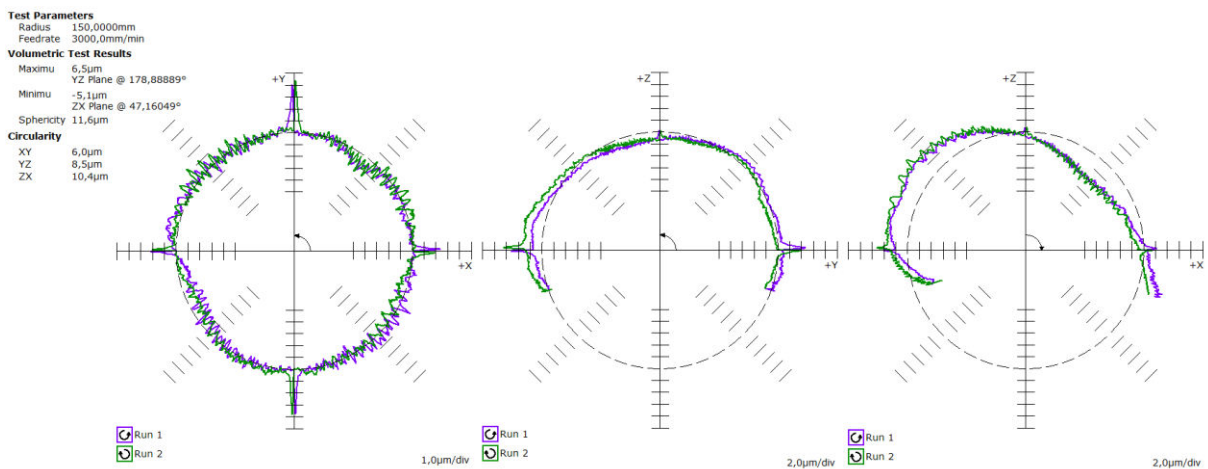


Obr. 9.: Test kruhovej interpolácie v rovine ZX, 220°, 150 mm

Error	Magnitude	Independent circularity	Ranking
Backlash Z	↕ 0,0	0,0µm (0%)	(10)
Backlash X	↳ -0,1 ◀ -0,3µm	0,3µm (2%)	(5)
Reversal spikes Z	↳ 1,3	1,3µm (10%)	(3)
Reversal spikes X	↳ 2,2 ◀ 1,8µm	2,2µm (16%)	(2)
Lateral play Z	↔ -0,3	0,1µm (1%)	(8)
Lateral play X	↳ -0,1 ◀ -0,2µm	0,1µm (1%)	(7)
Cyclic error Z	↑ 0,3 ↓ 0,3µm	0,3µm (2%)	(6)
Cyclic error X	↑ 0,7 ↓ 0,1µm	0,7µm (5%)	(4)
Servo mismatch	0,00ms	0,1µm (0%)	(9)
Squareness	57,1µm/m	8,6µm (62%)	(1)
Cyclic pitch Z	3,5000mm		
Cyclic pitch X	5,0000mm		
Calculated feedrate	2985,1mm/min		
Centre offset Z	2,1µm		
Centre offset X	6,4µm		
Best fit radius	150,0000mm		
Circularity	10,4µm		

Obr. 8.: Výsledné chyby v rovine ZX

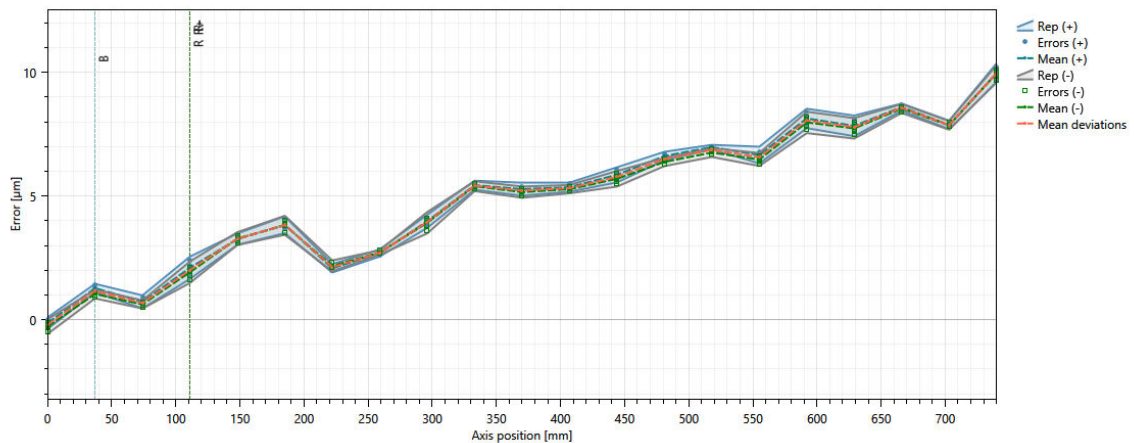
4. Volumetrická diagnóza



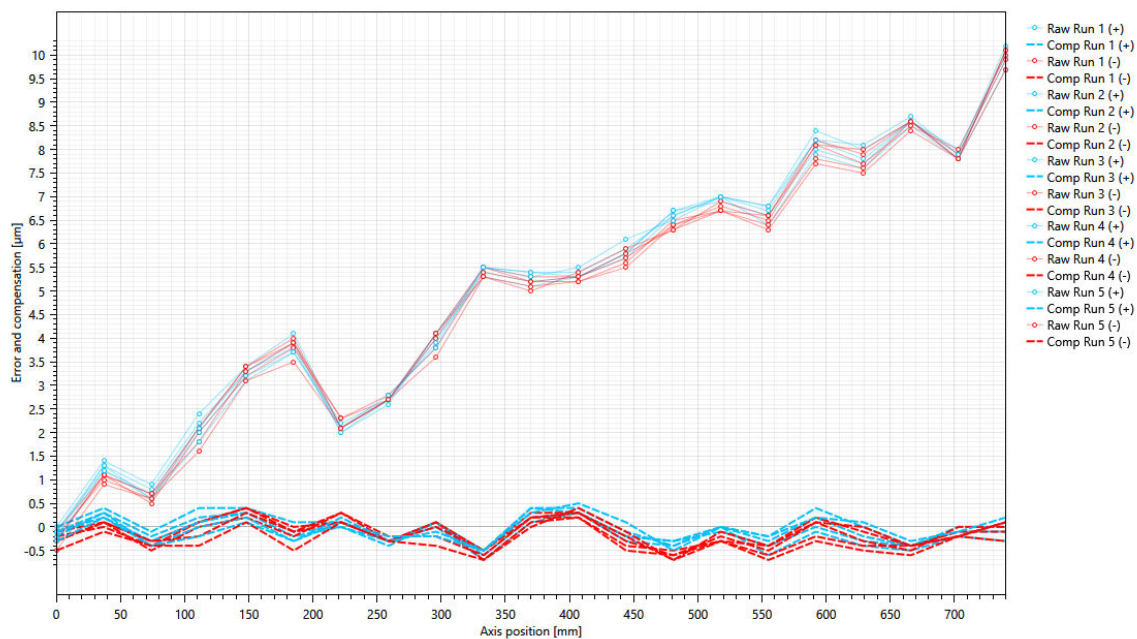
Obr. 10.: Volumetrická kompenzácia, vľavo rovina XY, v strede rovina YZ, vpravo rovina ZX

1. Polohovanie v ose X

Index (-)	Poloha (mm)	Odchýlka (µm)									
		Run 1 (+)	Run 1 (-)	Run 2 (+)	Run 2 (-)	Run 3 (+)	Run 3 (-)	Run 4 (+)	Run 4 (-)	Run 5 (+)	Run 5 (-)
1	0,0000	0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,3	-0,2	-0,3	-0,3	-0,5
2	37,0000	1,4	1,1	1,3	1,0	1,2	1,1	1,3	1,1	1,2	0,9
3	74,0000	0,9	0,7	0,8	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7	0,6	0,6
4	111,0000	2,4	2,1	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0	1,8	1,8	1,6
5	148,0000	3,4	3,4	3,3	3,4	3,3	3,2	3,2	3,3	3,1	3,1
6	185,0000	4,1	4,0	3,9	3,9	3,8	3,8	3,7	3,9	3,7	3,5
7	222,0000	2,1	2,1	2,0	2,1	2,0	2,3	2,2	2,3	2,1	2,1
8	259,0000	2,7	2,7	2,6	2,7	2,7	2,7	2,7	2,8	2,8	2,7
9	296,0000	4,0	4,1	4,1	4,0	4,1	4,1	3,9	3,8	3,8	3,6
10	333,0000	5,3	5,3	5,4	5,5	5,5	5,5	5,5	5,4	5,5	5,3
11	370,0000	5,1	5,1	5,2	5,2	5,4	5,3	5,4	5,2	5,3	5,0
12	407,0000	5,3	5,2	5,3	5,2	5,3	5,3	5,4	5,3	5,5	5,4
13	444,0000	5,7	5,5	5,8	5,6	5,8	5,7	5,9	5,8	6,1	5,9
14	481,0000	6,6	6,4	6,7	6,5	6,7	6,4	6,6	6,3	6,5	5,3
15	518,0000	7,0	6,7	6,9	6,7	7,0	6,8	7,0	6,9	7,0	5,7
16	555,0000	6,4	6,3	6,6	6,4	6,7	6,5	6,8	6,6	6,8	6,6
17	592,0000	7,9	7,7	8,0	7,8	8,2	8,1	8,4	8,2	8,2	8,1
18	629,0000	7,6	7,5	7,7	7,6	7,8	7,7	8,0	7,9	8,1	8,0
19	666,0000	8,5	8,4	8,6	8,6	8,6	8,5	8,6	8,6	8,7	8,6
20	703,0000	7,8	7,8	7,9	7,9	8,0	8,0	7,8	7,8	7,9	7,8
21	740,0000	9,7	9,7	9,9	9,9	10,0	10,0	10,1	10,1	10,2	10,1



Obr. 1: Chyby polohovania v ose X podľa ISO 230-2



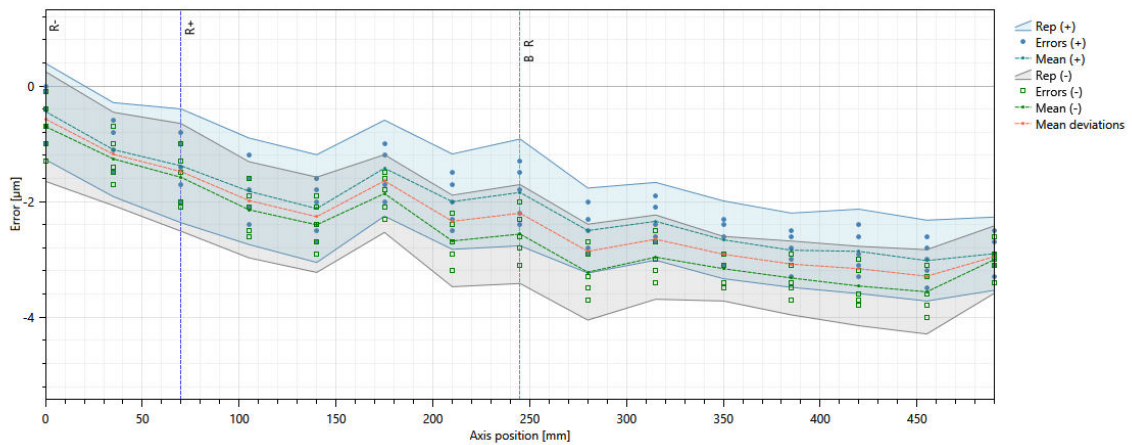
Obr. 2: Dvojsmerná kompenzácia chýb na ose X

Tab. 1: Kompenzačná tabuľka pre osu X

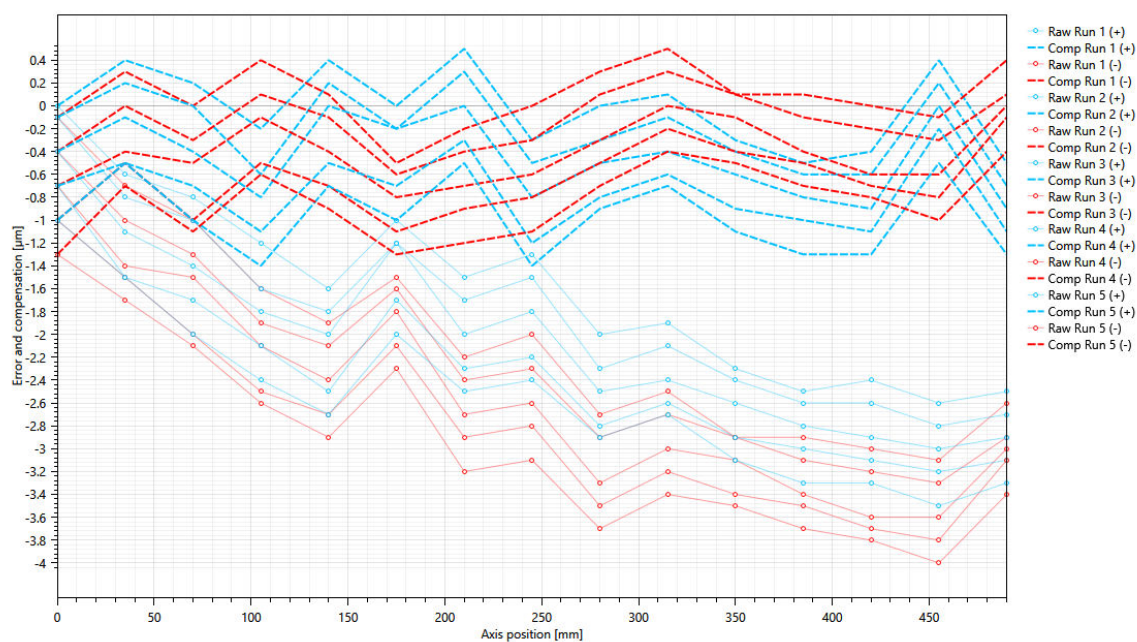
Index	Position (mm)	Forward direction (Scale : 1)	Reverse direction (Scale : 1)
1	0.0000	0	0
2	37.0000	-1	-1
3	74.0000	0	0
4	111.0000	-1	-1
5	148.0000	-1	-1
6	185.0000	-1	-1
7	222.0000	2	2
8	259.0000	-1	-1
9	296.0000	-1	-1
10	333.0000	-2	-2
11	370.0000	1	1
12	407.0000	0	0
13	444.0000	-1	-1
14	481.0000	-1	-1
15	518.0000	0	0
16	555.0000	0	0
17	592.0000	-1	-1
18	629.0000	0	0
19	666.0000	-1	-1
20	703.0000	1	1
21	740.0000	-2	-2

2. Polohovanie v ose Y

Index (-)	Poloha (mm)	Odchýlka (µm)									
		Run 1 (+)	Run 1 (-)	Run 2 (+)	Run 2 (-)	Run 3 (+)	Run 3 (-)	Run 4 (+)	Run 4 (-)	Run 5 (+)	Run 5 (-)
1	0,0000	0	-0,1	-0,1	-0,4	-0,4	-0,7	-0,7	-1,0	-1,0	-1,3
2	35,0000	-0,6	-0,7	-0,8	-1,0	-1,1	-1,4	-1,5	-1,5	-1,5	-1,7
3	70,0000	-0,8	-1,0	-1,0	-1,3	-1,4	-1,5	-1,7	-2,0	-2,0	-2,1
4	105,0000	-1,2	-1,6	-1,6	-1,9	-1,8	-2,1	-2,1	-2,5	-2,4	-2,6
5	140,0000	-1,6	-1,9	-1,8	-2,1	-2,0	-2,4	-2,5	-2,7	-2,7	-2,9
6	175,0000	-1,0	-1,5	-1,2	-1,6	-1,2	-1,8	-1,7	-2,1	-2,0	-2,3
7	210,0000	-1,5	-2,2	-1,7	-2,4	-2,0	-2,7	-2,3	-2,9	-2,5	-3,2
8	245,0000	-1,3	-2,0	-1,5	-2,3	-1,8	-2,6	-2,2	-2,8	-2,4	-3,1
9	280,0000	-2,0	-2,7	-2,3	-2,9	-2,5	-3,3	-2,8	-3,5	-2,9	-3,7
10	315,0000	-1,9	-2,5	-2,1	-2,7	-2,4	-3,0	-2,6	-3,2	-2,7	-3,4
11	350,0000	-2,3	-2,9	-2,4	-2,9	-2,6	-3,1	-2,9	-3,4	-3,1	-3,5
12	385,0000	-2,5	-2,9	-2,6	-3,1	-2,8	-3,4	-3,0	-3,5	-3,3	-3,7
13	420,0000	-2,4	-3,0	-2,6	-3,2	-2,9	-3,6	-3,1	-3,7	-3,3	-3,8
14	455,0000	-2,6	-3,1	-2,8	-3,3	-3,0	-3,6	-3,2	-3,8	-3,5	-4,0
15	490,0000	-2,5	-2,6	-2,7	-2,9	-2,9	-3,0	-3,1	-3,1	-3,3	-3,4



Obr. 3: Chyby polohovania v ose Y podľa ISO 230-2



Obr. 4: Dvojsmerná kompenzácia chýb na ose Y

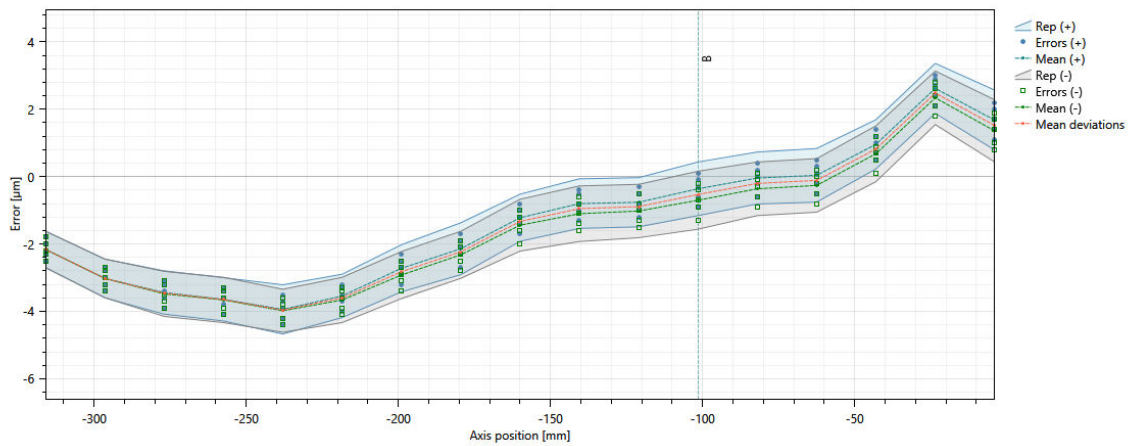
Tab. 2: Kompenzačná tabuľka pre osu Y

Index	Position (mm)	Forward direction (Scale : 1)	Reverse direction (Scale : 1)
1	0.0000	0	0
2	35.0000	1	1
3	70.0000	0	0
4	105.0000	0	1
5	140.0000	1	0
6	175.0000	-1	-1
7	210.0000	1	1
8	245.0000	-1	0
9	280.0000	1	1
10	315.0000	0	0
11	350.0000	0	0
12	385.0000	0	0
13	420.0000	0	0
14	455.0000	1	0
15	490.0000	-1	0

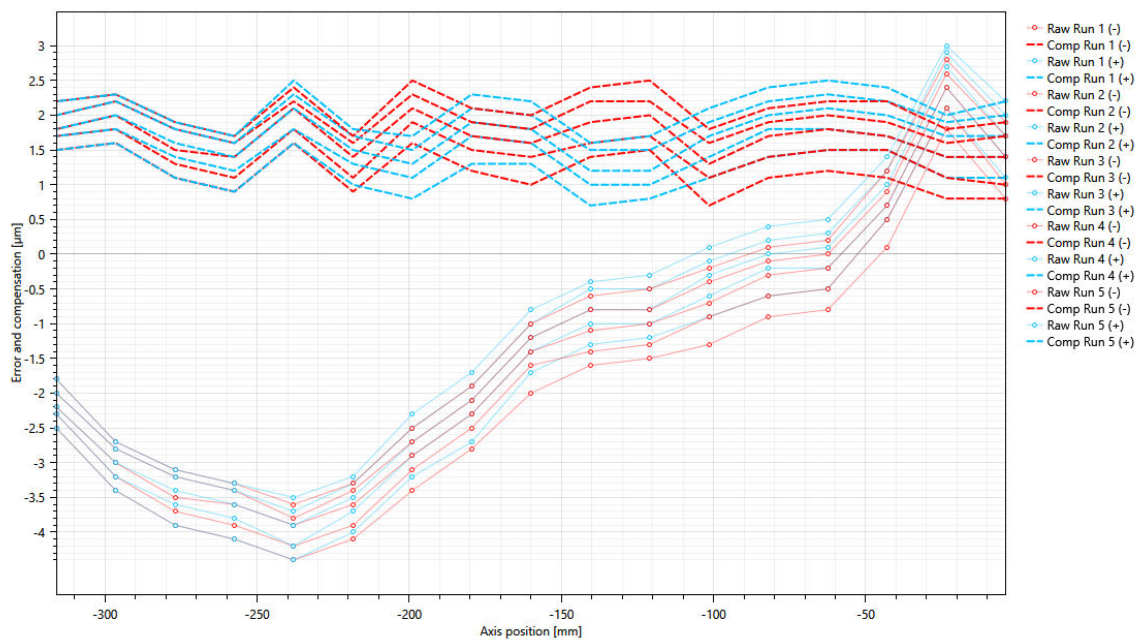
3. Polohovanie v ose Z

3.1. Z_MA_VCS1_CEC1

Index (-)	Poloha (mm)	Odchýlka (µm)									
		Run 1 (-)	Run 1 (+)	Run 2 (-)	Run 2 (+)	Run 3 (-)	Run 3 (+)	Run 4 (-)	Run 4 (+)	Run 5 (-)	Run 5 (+)
1	-4.0000	0.8	1.1	1.0	1.4	1.4	1.7	1.7	2.0	1.9	2.2
2	-23.5000	1.8	2.1	2.1	2.4	2.4	2.7	2.6	2.9	2.8	3.0
3	-43.0000	0.1	0.5	0.5	0.7	0.7	1.0	0.9	1.2	1.2	1.4
4	-62.5000	-0.8	-0.5	-0.5	-0.2	-0.2	0.1	0.0	0.3	0.2	0.5
5	-82.0000	-0.9	-0.6	-0.6	-0.2	-0.3	0.0	-0.1	0.2	0.1	0.4
6	-101.5000	-1.3	-0.9	-0.9	-0.6	-0.7	-0.3	-0.4	-0.1	-0.2	0.1
7	-121.0000	-1.5	-1.2	-1.3	-1.0	-1.0	-0.8	-0.8	-0.5	-0.5	-0.3
8	-140.5000	-1.6	-1.3	-1.4	-1.0	-1.1	-0.8	-0.8	-0.5	-0.6	-0.4
9	-160.0000	-2.0	-1.7	-1.6	-1.4	-1.4	-1.2	-1.2	-1.0	-1.0	-0.8
10	-179.5000	-2.8	-2.7	-2.5	-2.3	-2.3	-2.1	-2.1	-1.9	-1.9	-1.7
11	-199.0000	-3.4	-3.2	-3.1	-2.9	-2.9	-2.7	-2.7	-2.5	-2.5	-2.3
12	-218.5000	-4.1	-4.0	-3.9	-3.7	-3.6	-3.5	-3.4	-3.3	-3.3	-3.2
13	-238.0000	-4.4	-4.4	-4.2	-4.2	-3.9	-3.9	-3.8	-3.7	-3.6	-3.5
14	-257.5000	-4.1	-4.1	-3.9	-3.8	-3.6	-3.6	-3.4	-3.4	-3.3	-3.3
15	-277.0000	-3.9	-3.9	-3.7	-3.6	-3.6	-3.5	-3.4	-3.2	-3.2	-3.1
16	-296.5000	-3.4	-3.4	-3.2	-3.2	-3.0	-3.0	-2.8	-2.8	-2.7	-2.7
17	-316.0000	-2.5	-2.5	-2.3	-2.3	-2.2	-2.2	-2.0	-2.0	-1.8	-1.8



Obr. 6: Chyby polohovania v ose Z, VCS1_CEC1 podľa ISO 230-2



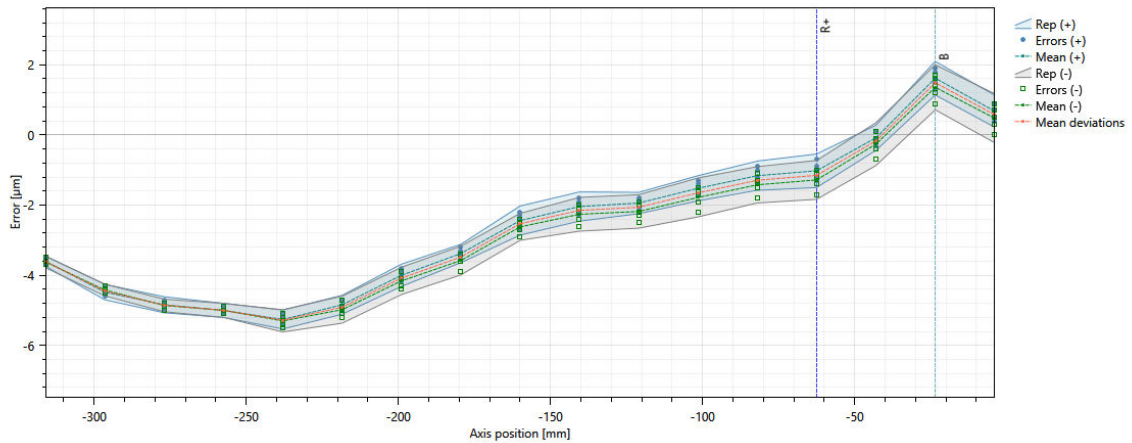
Obr. 5: Dvojsmerná kompenzácia chýb na ose Z, VCS1_CEC1

Tab. 3: Kompenzačná tabuľka pre osu Z, VCS1_CEC1

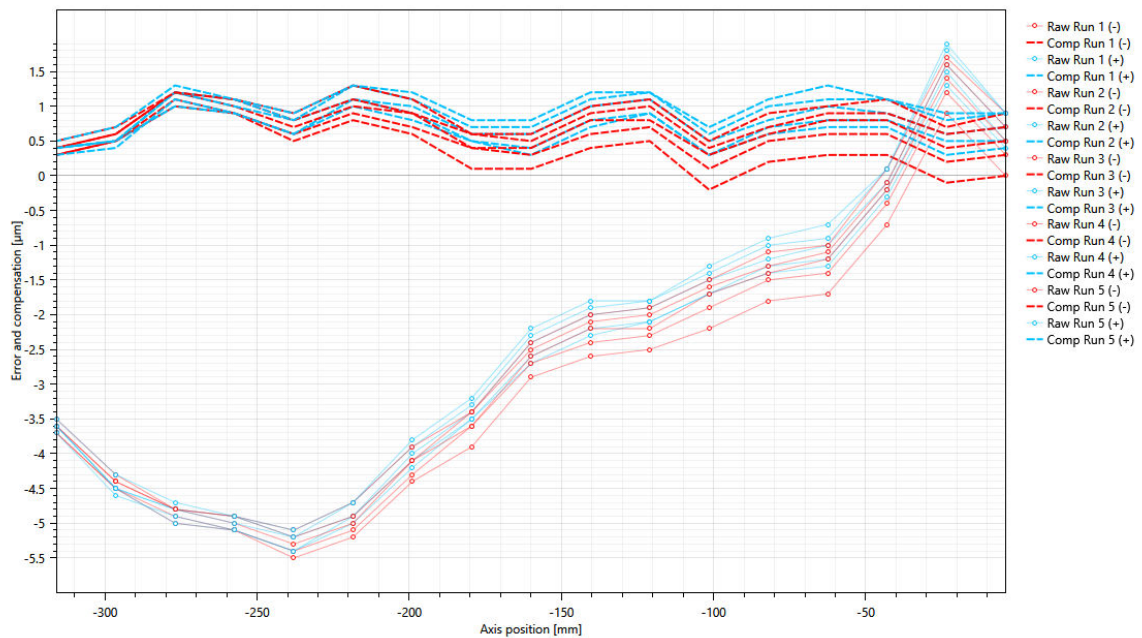
Index	Position (mm)	Forward direction (Scale : 1)	Reverse direction (Scale : 1)
1	-316.0000	-1	-1
2	-296.5000	0	0
3	-277.0000	0	0
4	-257.5000	-1	-1
5	-238.0000	1	1
6	-218.5000	1	0
7	-199.0000	0	1
8	-179.5000	1	1
9	-160.0000	1	0
10	-140.5000	0	0
11	-121.0000	0	1
12	-101.5000	0	0
13	-82.0000	0	0
14	-62.5000	1	1
15	-43.0000	2	2
16	-23.5000	-1	-1
17	-4.0000	0	0

3.2. Z_MA_VCS1_CEC0

Index (-)	Poloha (mm)	Odchýlka (µm)									
		Run 1 (-)	Run 1 (+)	Run 2 (-)	Run 2 (+)	Run 3 (-)	Run 3 (+)	Run 4 (-)	Run 4 (+)	Run 5 (-)	Run 5 (+)
1	-4.0000	0.0	0.4	0.3	0.5	0.5	0.7	0.7	0.9	0.9	0.9
2	-23.5000	0.9	1.3	1.2	1.5	1.4	1.6	1.6	1.8	1.7	1.9
3	-43.0000	-0.7	-0.3	-0.4	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1
4	-62.5000	-1.7	-1.3	-1.4	-1.2	-1.2	-1.0	-1.1	-0.9	-1.0	-0.7
5	-82.0000	-1.8	-1.4	-1.5	-1.3	-1.4	-1.2	-1.3	-1.0	-1.1	-0.9
6	-101.5000	-2.2	-1.7	-1.9	-1.7	-1.7	-1.5	-1.6	-1.4	-1.5	-1.3
7	-121.0000	-2.5	-2.1	-2.3	-2.1	-2.2	-1.9	-2.0	-1.8	-1.9	-1.8
8	-140.5000	-2.6	-2.3	-2.4	-2.2	-2.2	-2.0	-2.1	-1.9	-2.0	-1.8
9	-160.0000	-2.9	-2.7	-2.7	-2.6	-2.6	-2.4	-2.5	-2.3	-2.4	-2.2
10	-179.5000	-3.9	-3.5	-3.6	-3.5	-3.6	-3.4	-3.4	-3.3	-3.4	-3.2
11	-199.0000	-4.4	-4.2	-4.3	-4.1	-4.1	-4.0	-4.1	-3.9	-3.9	-3.8
12	-218.5000	-5.2	-5.0	-5.1	-4.9	-5.0	-4.9	-4.9	-4.7	-4.7	-4.7
13	-238.0000	-5.5	-5.4	-5.4	-5.4	-5.3	-5.2	-5.2	-5.2	-5.1	-5.1
14	-257.5000	-5.1	-5.1	-5.1	-5.1	-5.0	-5.0	-4.9	-4.9	-4.9	-4.9
15	-277.0000	-5.0	-5.0	-4.9	-4.9	-4.8	-4.8	-4.8	-4.8	-4.8	-4.7
16	-296.5000	-4.5	-4.5	-4.5	-4.6	-4.4	-4.5	-4.4	-4.5	-4.3	-4.3
17	-316.0000	-3.7	-3.6	-3.7	-3.7	-3.6	-3.6	-3.6	-3.6	-3.5	-3.5



Obr. 8: Chyby polohovania v ose Z, VCS1_CEC0 podľa ISO 230-2



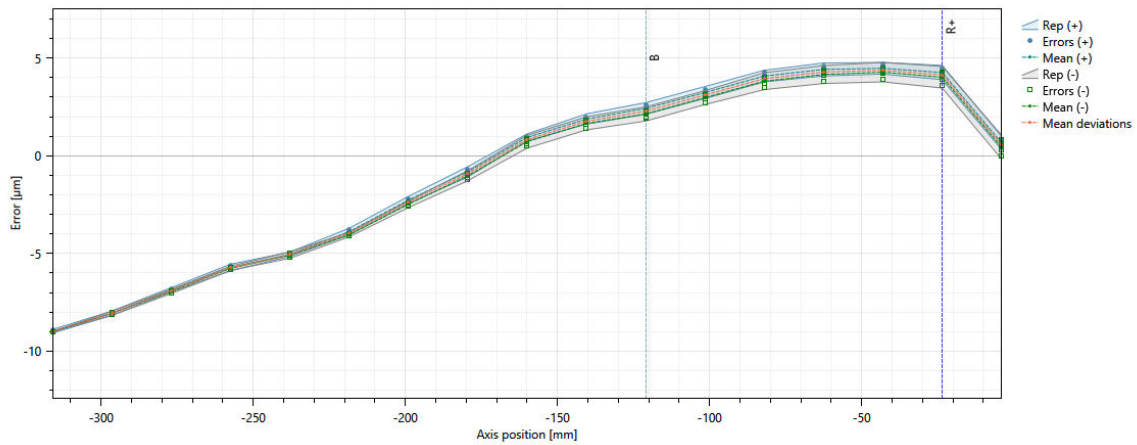
Obr. 7: Dvojsmerná kompenzácia chýb na ose Z, VCS1_CEC0

Tab. 4: Kompenzačná tabuľka pre osu Z, VCS1_CEC0

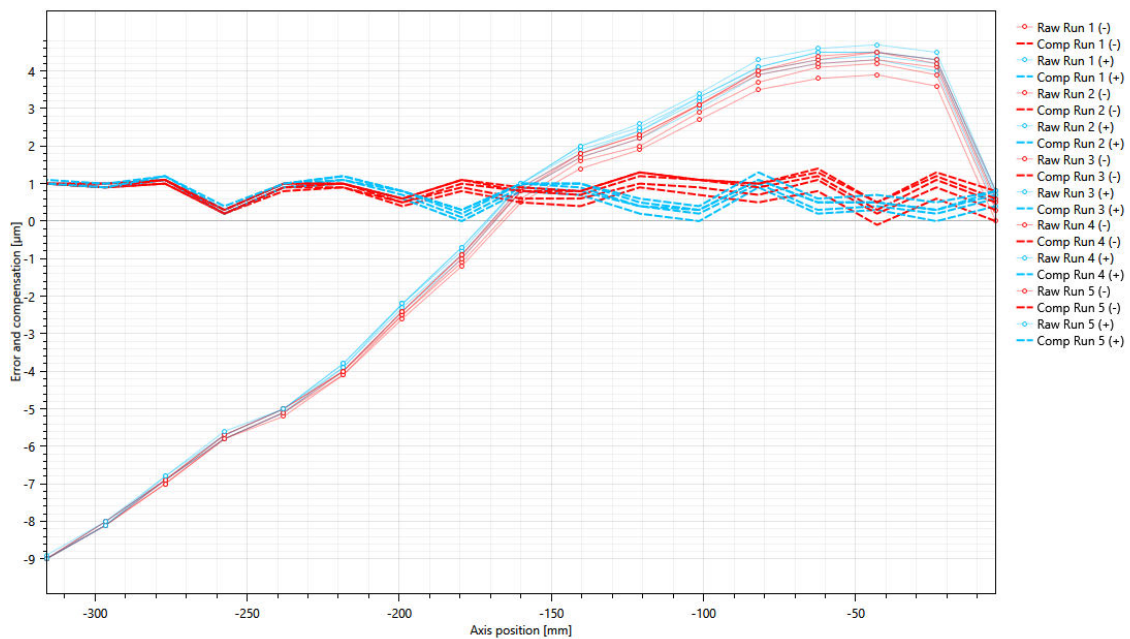
Index	Position (mm)	Forward direction (Scale : 1)	Reverse direction (Scale : 1)
1	-316.0000	-1	-1
2	-296.5000	-1	-1
3	-277.0000	0	0
4	-257.5000	0	0
5	-238.0000	0	0
6	-218.5000	1	1
7	-199.0000	1	1
8	-179.5000	1	1
9	-160.0000	0	0
10	-140.5000	0	0
11	-121.0000	1	1
12	-101.5000	0	0
13	-82.0000	0	0
14	-62.5000	1	1
15	-43.0000	2	2
16	-23.5000	-1	-1
17	-4.0000	0	0

3.3. Z_MA_nekomp_VCS0_CEC0

Index (-)	Poloha (mm)	Odchýlka (µm)									
		Run 1 (-)	Run 1 (+)	Run 2 (-)	Run 2 (+)	Run 3 (-)	Run 3 (+)	Run 4 (-)	Run 4 (+)	Run 5 (-)	Run 5 (+)
1	-4.0000	0.0	0.4	0.3	0.6	0.5	0.7	0.6	0.8	0.8	0.8
2	-23.5000	3.6	4.0	3.9	4.2	4.1	4.3	4.2	4.3	4.3	4.5
3	-43.0000	3.9	4.3	4.2	4.4	4.3	4.5	4.5	4.5	4.5	4.7
4	-62.5000	3.8	4.2	4.1	4.3	4.2	4.5	4.3	4.5	4.4	4.6
5	-82.0000	3.5	3.9	3.7	4.0	3.9	4.1	4.0	4.1	4.0	4.3
6	-101.5000	2.7	3.0	2.9	3.2	3.1	3.3	3.1	3.3	3.1	3.4
7	-121.0000	1.9	2.2	2.0	2.4	2.2	2.4	2.3	2.5	2.3	2.6
8	-140.5000	1.4	1.7	1.6	1.8	1.7	1.9	1.8	2.0	1.8	2.0
9	-160.0000	0.5	0.8	0.6	0.9	0.8	1.0	0.8	1.0	0.9	1.0
10	-179.5000	-1.2	-1.0	-1.1	-0.9	-1.0	-0.8	-0.9	-0.7	-0.9	-0.7
11	-199.0000	-2.6	-2.4	-2.5	-2.3	-2.5	-2.2	-2.4	-2.2	-2.4	-2.2
12	-218.5000	-4.1	-4.0	-4.1	-3.9	-4.0	-3.9	-4.0	-3.8	-4.0	-3.8
13	-238.0000	-5.1	-5.1	-5.2	-5.1	-5.1	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0
14	-257.5000	-5.8	-5.8	-5.8	-5.8	-5.8	-5.7	-5.7	-5.7	-5.7	-5.6
15	-277.0000	-7.0	-6.9	-7.0	-6.9	-6.9	-6.9	-6.9	-6.8	-6.9	-6.8
16	-296.5000	-8.1	-8.1	-8.1	-8.1	-8.0	-8.0	-8.0	-8.0	-8.1	-8.1
17	-316.0000	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-8.9	-9.0	-9.0



Obr. 10: Chyby polohovania v ose Z, VCS0_CEC0 podľa ISO 230-2



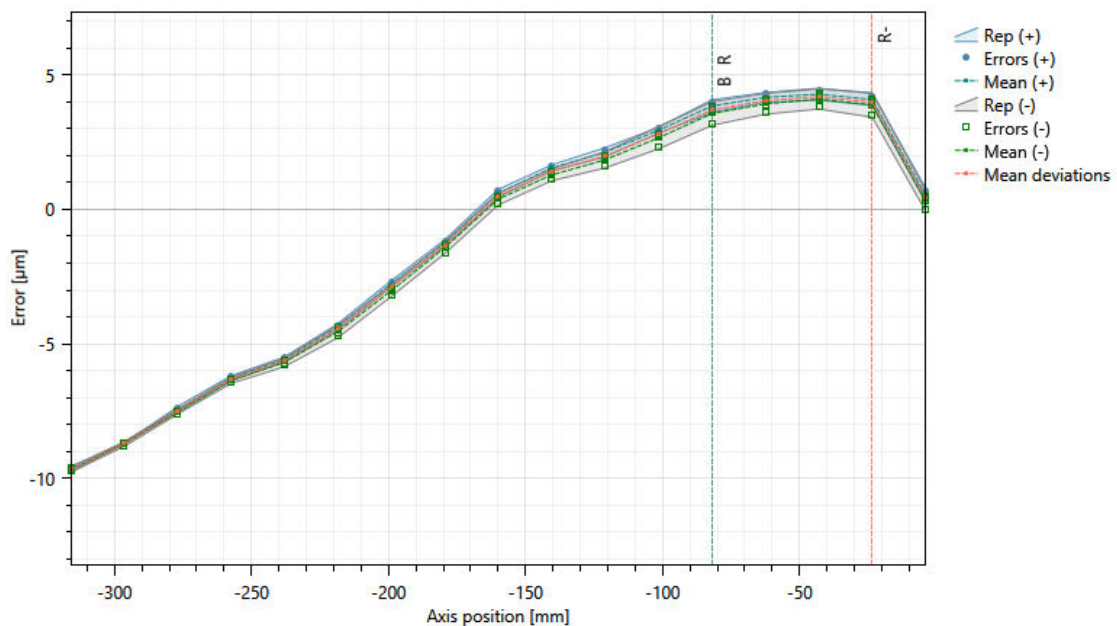
Obr. 9: Dvojsmerná kompenzácia chýb na ose Z, VCS0_CEC0

Tab. 5: Kompenzačná tabuľka pre osu Z, VCS0_CEC0

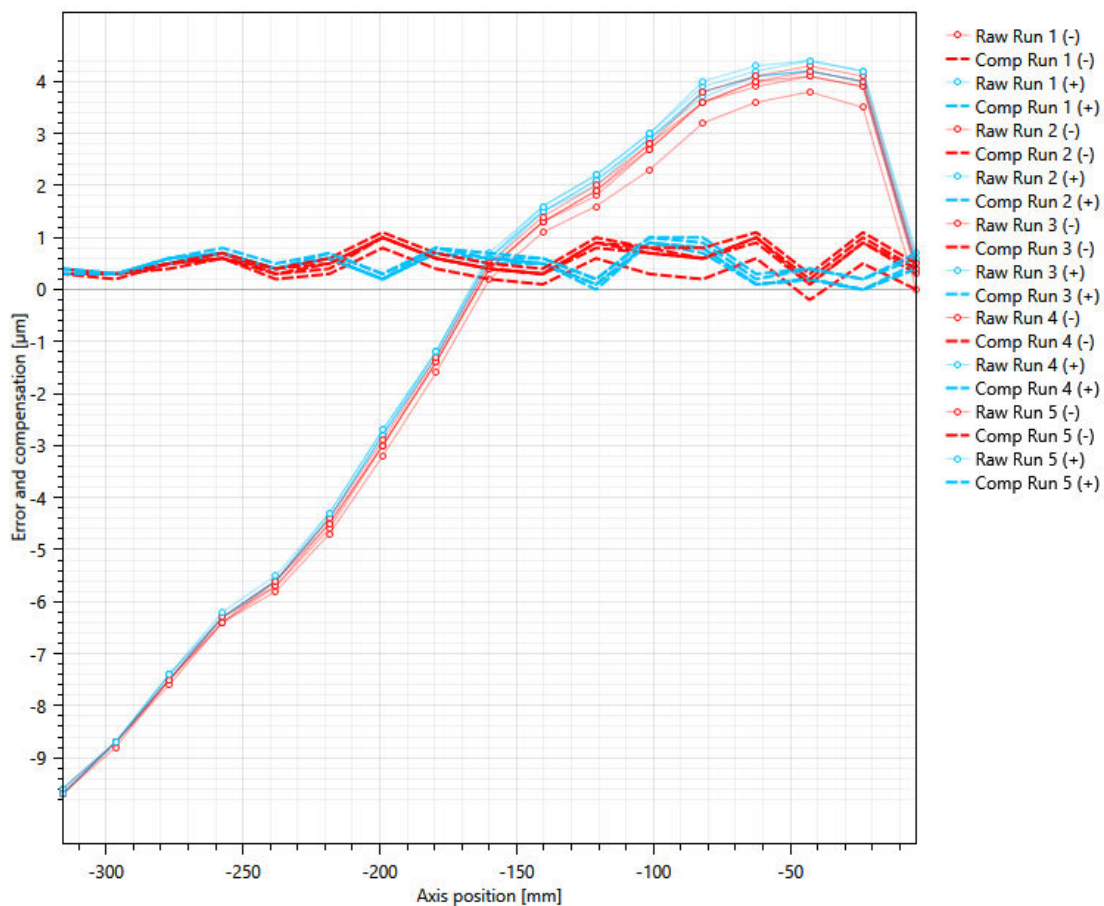
Index	Position (mm)	Forward direction (Scale : 1)	Reverse direction (Scale : 1)
1	-316.0000	1	1
2	-296.5000	1	1
3	-277.0000	2	2
4	-257.5000	0	0
5	-238.0000	1	1
6	-218.5000	2	2
7	-199.0000	2	1
8	-179.5000	1	2
9	-160.0000	1	1
10	-140.5000	1	0
11	-121.0000	1	1
12	-101.5000	0	1
13	-82.0000	1	0
14	-62.5000	0	1
15	-43.0000	0	-1
16	-23.5000	-4	-3
17	-4.0000	0	0

3.4. Z_MA_nekomp_VCS0_CEC1

Index (-)	Poloha (mm)	Odchýlka (µm)									
		Run 1 (-)	Run 1 (+)	Run 2 (-)	Run 2 (+)	Run 3 (-)	Run 3 (+)	Run 4 (-)	Run 4 (+)	Run 5 (-)	Run 5 (+)
1	-4.0000	0.0	0.5	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.6	0.5	0.7
2	-23.5000	3.5	4.0	3.9	4.0	3.9	4.0	4.0	4.2	4.1	4.2
3	-43.0000	3.8	4.2	4.1	4.2	4.1	4.2	4.2	4.4	4.3	4.4
4	-62.5000	3.6	4.1	3.9	4.1	4.0	4.1	4.0	4.2	4.1	4.3
5	-82.0000	3.2	3.8	3.6	3.8	3.6	3.7	3.6	3.9	3.8	4.0
6	-101.5000	2.3	2.9	2.7	2.9	2.7	2.9	2.8	3.0	2.8	3.0
7	-121.0000	1.6	2.0	1.8	2.1	1.9	2.1	1.9	2.2	2.0	2.2
8	-140.5000	1.1	1.5	1.3	1.5	1.3	1.5	1.3	1.6	1.4	1.6
9	-160.0000	0.2	0.6	0.4	0.6	0.4	0.5	0.4	0.6	0.5	0.7
10	-179.5000	-1.6	-1.3	-1.4	-1.2	-1.4	-1.3	-1.4	-1.2	-1.3	-1.2
11	-199.0000	-3.2	-2.8	-3.0	-2.8	-3.0	-2.8	-3.0	-2.7	-2.9	-2.7
12	-218.5000	-4.7	-4.4	-4.5	-4.4	-4.6	-4.4	-4.5	-4.3	-4.4	-4.3
13	-238.0000	-5.8	-5.6	-5.7	-5.6	-5.7	-5.6	-5.6	-5.6	-5.6	-5.5
14	-257.5000	-6.4	-6.3	-6.3	-6.3	-6.4	-6.3	-6.4	-6.3	-6.3	-6.2
15	-277.0000	-7.5	-7.4	-7.5	-7.5	-7.6	-7.5	-7.5	-7.4	-7.5	-7.4
16	-296.5000	-8.7	-8.7	-8.7	-8.7	-8.7	-8.7	-8.7	-8.7	-8.8	-8.7
17	-316.0000	-9.7	-9.7	-9.6	-9.6	-9.7	-9.7	-9.7	-9.6	-9.7	-9.7



Obr. 11: Chyby polohovania v ose Z, VCS0_CEC1 podľa ISO 230-2



Obr. 12: Dvojsmerná kompenzácia chýb na ose Z, VCS0_CEC1

Tab. 6: Kompenzačná tabuľka pre osu Z, VCS0_CEC1

Index	Position (mm)	Forward direction (Scale : 1)	Reverse direction (Scale : 1)
1	-316.0000	1	1
2	-296.5000	1	1
3	-277.0000	1	1
4	-257.5000	1	1
5	-238.0000	1	1
6	-218.5000	2	1
7	-199.0000	1	2
8	-179.5000	2	2
9	-160.0000	1	1
10	-140.5000	1	0
11	-121.0000	0	1
12	-101.5000	1	1
13	-82.0000	1	0
14	-62.5000	0	1
15	-43.0000	0	-1
16	-23.5000	-4	-3
17	-4.0000	0	0