

**Vysoké učení technické v Brně**

**Fakulta strojního inženýrství**

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

**Habilitační práce**

v oboru Konstrukční a procesní inženýrství

**Zvyšování pracovní přesnosti obráběcích strojů pomocí  
volumetrických kompenzací**

**Increasing the working accuracy of machine tools using  
volumetric compensation**

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

Soubor uveřejněných vědeckých prací doplněných komentářem  
dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách  
§ 72 Habilitační řízení

Brno 2020

**Klíčová slova**

Pracovní přesnost, výrobní přesnost, geometrická přesnost, volumetrická přesnost, kompenzace, obráběcí stroj, řídicí systém, simulace, LaserTRACER, laser interferometrie

**Keywords**

Working accuracy, Production accuracy, Geometric accuracy, Volumetric accuracy, Compensation, Machine tool, Control system, Simulation, LaserTRACER, Laser interferometrie

## **Poděkování**

Předložená práce zahrnuje problematiku napříč řadou oblastí, které byly převážně řešeny v rámci VaV projektů, a na kterých jsem měl možnost spolupracovat. Tímto bych chtěl poděkovat všem kolegům a zejména Ing. Janu Vetiškovi, Ph.D., a Ing. Tomáši Markovi, Ph.D., za jejich čas strávený měřením strojů a nad společnými diskusemi v rámci předloženého tématu. Chtěl bych poděkovat doc. Ing. Petru Blechovi, Ph.D., za jeho dlouholetou podporu a řadu odborných rad k vypracování habilitační práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Františku Bradáčovi, Ph.D., prof. Dr. Ing. Jiřímu Markovi, Ph.D., DBA, a doc. Ing. Róbertu Jankových, CSc., za celou řadu podnětných připomínek a hodin strávených v rámci konzultací. V neposlední řadě bych rád poděkoval rodičům za celoživotní podporu při studiu a děkuji manželce Martině za podporu a časovou toleranci, která byla nezbytná pro vypracování habilitační práce.

# Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	8
ÚVOD.....	13
MOTIVACE .....	15
1 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ V OBLASTI PRACOVNÍ PŘESNOSTI OBRÁBĚCÍCH STROJŮ .....	19
1.1 Definice a názvosloví .....	19
1.2 Geometrická přesnost .....	22
1.3 Přesnost a opakovatelnost najetí do polohy.....	23
1.4 Volumetrická přesnost.....	28
1.5 Kvazi-statické chyby .....	31
1.6 Pracovní přesnost.....	31
1.7 Výrobní přesnost .....	33
1.8 Současný stav poznání.....	34
1.8.1 Průmyslové aplikace – měření volumetrické přesnosti .....	34
1.8.2 Řešená témata na vědecko-výzkumných pracovištích .....	38
1.9 Dílčí závěr.....	44
2 PŘÍNOS AUTORA KE STAVU POZNÁNÍ V OBLASTI HODNOCENÍ VOLUMETRICKÉ PŘESNOSTI CNC OBRÁBĚCÍCH STROJŮ .....	45
2.1 Úvod do oblasti volumetrické přesnosti .....	45
2.1.1 Závislost mezi volumetrickou a pracovní přesností.....	46
2.1.2 Požadavky kladené na volumetrické kompenzace .....	47
2.2 Zařízení pro měření volumetrické přesnosti.....	48
2.2.1 Ballbar.....	51
2.2.2 Laser interferometr.....	52
2.2.3 Digitální inklinometr .....	54
2.2.4 Rotary analyzer .....	55
2.2.5 Laser tracker .....	56
2.2.6 LaserTRACER .....	58
2.2.7 Absolute Multiline technologie.....	59
2.3 CNC Obráběcí stroje .....	60



2.3.1	<i>Třiosé frézovací vertikální obráběcí centrum</i> .....	60
2.3.2	<i>Horizontální frézovací a vyvrtávací stroj</i> .....	62
2.3.3	<i>Svislé soustruhy</i> .....	64
2.3.4	<i>Víceosá CNC obráběcí centra</i> .....	67
2.4	Dílčí závěr vlastního přínosu .....	69
3	SOUČASNÝ STAV A PŘÍNOS AUTORA KE STAVU POZNÁNÍ V OBLASTI SOFTWAREVÝCH KOMPENZACÍ OBRÁBĚCÍCH STROJŮ .....	72
3.1	Úvod v oblasti softwarových kompenzací .....	72
3.2	Kompenzace geometrických chyb .....	72
3.3	Standardní typy kompenzací na CNC obráběcích strojích.....	75
3.3.1	<i>Backlash</i> .....	75
3.3.2	<i>Kompenzace stoupání šroubu a chyby odměřování</i> .....	76
3.3.3	<i>Kompenzace SAG</i> .....	78
3.4	Dílčí závěr.....	84
4	PŘÍNOS AUTORA V OBLASTI VYUŽITÍ POKROČILÝCH SOFTWAREVÝCH KOMPENZACÍ .....	85
4.1	Volumetrické kompenzace .....	85
4.1.1	<i>Základní volumetrické kompenzace</i> .....	85
4.1.2	<i>Efektivní nasazení volumetrických kompenzací</i> .....	86
4.1.3	<i>Nové požadavky na CNC obráběcí stroje</i> .....	89
4.2	Případové studie pro ověření poznámek z kap. 6.1 .....	90
4.2.1	<i>Třiosé obráběcí centrum</i> .....	90
4.3	Návrh nové metodiky měření geometrické přesnosti .....	94
4.3.1	<i>Popis současného stavu</i> .....	94
4.3.2	<i>Stavba obráběcích strojů</i> .....	95
4.3.3	<i>Geometrická přesnost CNC obráběcích strojů</i> .....	96
4.3.4	<i>Charakteristika novosti metodiky</i> .....	97
4.3.5	<i>Popis a postup zavedení metodiky</i> .....	98
4.3.6	<i>Uživatelé metodiky</i> .....	99
4.3.7	<i>Dílčí závěr</i> .....	100
4.4	Pětiosé obráběcí centrum.....	100
4.4.1	<i>Cíl metodiky</i> .....	101

4.4.2	<i>Popis současného stavu</i> .....	102
4.4.3	<i>Volumetrická přesnost pětiosých obráběcích center</i> .....	102
4.4.4	<i>Verifikace volumetrické přesnosti pětiosých obráběcích center</i> .....	103
4.4.5	<i>Charakteristika novosti postupu metodiky</i> .....	104
4.4.6	<i>Popis a postup zavedení metodiky</i> .....	105
4.4.7	<i>Uživatelé navržené metodiky</i> .....	106
4.4.8	<i>Případová studie – ověření metodického přístupu na stroji DMG MORI, DMU 75 monoblock</i> .....	106
4.4.9	<i>Dílčí závěr</i> .....	126
4.5	<i>Dílčí závěr</i> .....	127
5	<b>ZVYŠOVÁNÍ PRACOVNÍ PŘESNOSTI POMOCÍ VOLUMETRICKÝCH KOMPENZACÍ</b> .....	130
5.1	<i>Úvod do oblasti zvyšování pracovní přesnosti</i> .....	130
5.2	<i>Případové studie</i> .....	131
5.2.1	<i>Případová studie vlivu volumetrické přesnosti na výsledné pracovní přesnosti - kruhovitosti</i> .....	132
5.2.2	<i>Případová studie vlivu volumetrické přesnosti na výsledné pracovní přesnosti obrobku dle ISO 10791-7: 2014</i> .....	144
5.3	<i>Dílčí závěr</i> .....	149
6	<b>DALŠÍ POSTUPY ZVYŠOVÁNÍ VÝROBNÍ PŘESNOSTI</b> .....	151
6.1	<i>Další výzkum v oblasti zvyšování výrobní přesnosti</i> .....	151
6.2	<i>Cíl dalšího výzkumu v chování výrobní přesnosti</i> .....	152
7	<b>ZHODNOCENÍ PŘEDKLÁDANÉ HABILITAČNÍ PRÁCE</b> .....	153
7.1	<i>Aktuálnost řešené problematiky a shrnutí práce</i> .....	153
7.2	<i>Vlastní podíl vědecké práce na předkládaných výsledcích</i> .....	155
7.3	<i>Přínosy práce</i> .....	158
7.3.1	<i>Vědecký a teoretický přínos</i> .....	158
7.3.2	<i>Praktický přínos</i> .....	159
7.3.3	<i>Pedagogický přínos</i> .....	160
7.4	<i>Možnosti dalšího využití výsledků práce</i> .....	160
	<b>ZÁVĚR</b> .....	162

LITERATURA .....	163
SEZNAM PŘÍLOH .....	171
Příloha 1 - Certifikát metodiky – Metodický postup efektivní stavby obráběcích strojů .....	171
Příloha 2 - Certifikát metodiky – Metodický postup zavádění volumetrických kompenzací pětiosých obráběcích center s kinematikou „BK“ .....	171

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<b>A</b>	Obousměrná chyba nastavení polohy v ose
<b>ADM</b>	Aboslut distanc measurement
<b>A0C</b>	Kolmost osy pivotu C ve směru osy A
<b>B</b>	Necitlivost v ose
<b>BK4</b>	Kruhová inteprolace pro simultální pětiosé řízení
<b>B0A</b>	Kolmost osy pivotu A ve směru osy B
<b>B0C</b>	Kolmost osy pivotu C ve směru osy B
<b>CEC</b>	Cross Error Compensation
<b>CECIMO</b>	European Association of the Machine Tool Industries and related Manufacturing Technologies
<b><math>c_g</math></b>	Index způsobilosti měřidla hodnotící preciznost
<b><math>c_{gk}</math></b>	Index způsobilosti měřidla hodnotící správnost
<b>CIRP</b>	(College International pour la Recherche en Productique) - The International Academy for Production Engineering
<b>CK SVT</b>	Centrum kompetence Strojírenské výrobní techniky
<b>CMM</b>	Souřadnicový měřicí stroj
<b>CMM1</b>	Coordinate measuring machine test 1
<b>CMM2</b>	Coordinate measuring machine test 2
<b>CNC</b>	Computer numerical control
<b><math>c_p</math></b>	Index způsobilosti procesu
<b><math>c_{pk}</math></b>	Index způsobilosti procesu
<b>C0A</b>	Kolmost osy pivotu A ve směru osy C
<b>ČMI</b>	Český metrologický institut
<b>DBB</b>	Double ballbar
<b>DBB1</b>	Double ballbar test 1
<b>DBB2</b>	Double ballbar test 2
<b>DMS</b>	Dlouhodobá mezisektorová spolupráce
<b>DOF</b>	Počet stupňů volnosti
<b>dY</b>	Posunutí v ose Y
<b>Dz</b>	Kompenzační hodnota v ose Z

<b>E</b>	Obousměrná systematická chyba polohování v ose
<b>E<sub>AA</sub></b>	Úhlové polohování chyby pohybu osy A
<b>E<sub>AC</sub></b>	Chyba pohybu nakloněním C okolo osy X
<b>E<sub>AX</sub></b>	úhlová chyba X ve směru osy A (klopení)
<b>E<sub>AY</sub></b>	úhlová chyba Y ve směru osy A (klopení)
<b>E<sub>AZ</sub></b>	úhlová chyba Z ve směru osy A (klopení)
<b>E<sub>A0A</sub></b>	Chyba polohy nula v ose A
<b>E<sub>A0C</sub></b>	Chyba kolmosti C na Y
<b>E<sub>A0Z</sub></b>	Chyba kolmosti Z na Y
<b>E<sub>BA</sub></b>	Chyba pohybu nakloněním A okolo osy Y
<b>E<sub>BC</sub></b>	Chyba pohybu nakloněním C okolo osy Y
<b>E<sub>BX</sub></b>	úhlová chyba X ve směru osy B (valení)
<b>E<sub>BY</sub></b>	úhlová chyba Y ve směru osy B (valení)
<b>E<sub>BZ</sub></b>	úhlová chyba Z ve směru osy B (valení)
<b>E<sub>B0A</sub></b>	Chyba kolmosti A na X
<b>E<sub>B0C</sub></b>	Chyba kolmosti C na X
<b>E<sub>B0Z</sub></b>	Chyba kolmosti Z na X
<b>E<sub>CC</sub></b>	Úhlové polohování chyby pohybu osy C
<b>E<sub>CA</sub></b>	Chyba pohybu nakloněním A okolo osy Z
<b>E<sub>CX</sub></b>	úhlová chyba X ve směru osy C (vybočení)
<b>E<sub>CY</sub></b>	úhlová chyba Y ve směru osy C (vybočení)
<b>E<sub>CZ</sub></b>	úhlová chyba Z ve směru osy C (vybočení)
<b>E<sub>C0A</sub></b>	Chyba kolmosti A na Z
<b>E<sub>C0C</sub></b>	Chyba polohy nula v ose C
<b>E<sub>C0X</sub></b>	Chyba kolmosti X na Y
<b>E<sub>XA</sub></b>	Radiální chyba pohybu A ve směru osy X
<b>E<sub>XC</sub></b>	Radiální chyba pohybu C ve směru osy X
<b>E<sub>XX</sub></b>	Chyba polohování osy X
<b>E<sub>XY</sub></b>	Chyba přímosti Y ve směru osy X
<b>E<sub>XZ</sub></b>	Chyba přímosti Z ve směru osy X
<b>E<sub>X0C</sub></b>	Chyba polohy C ve směru osy X
<b>E<sub>YA</sub></b>	Radiální chyba pohybu A ve směru osy Y

<b>E<sub>YC</sub></b>	Radiální chyba pohybu C ve směru osy Y
<b>E<sub>YX</sub></b>	Chyba přímosti X ve směru osy Y
<b>E<sub>YY</sub></b>	Chyba polohování osy Y
<b>E<sub>YZ</sub></b>	Chyba přímosti Z ve směru osy Y
<b>E<sub>Y0A</sub></b>	Chyba polohy A ve směru osy X
<b>E<sub>Y0C</sub></b>	Chyba polohy C ve směru osy Y
<b>E<sub>ZA</sub></b>	Axiální chyba pohybu A
<b>E<sub>ZC</sub></b>	Axiální chyba pohybu C
<b>E<sub>ZX</sub></b>	Chyba přímosti X ve směru osy Z
<b>E<sub>ZY</sub></b>	Chyba přímosti Y ve směru osy Z
<b>E<sub>ZZ</sub></b>	Chyba polohování osy Z
<b>E<sub>Z0A</sub></b>	Chyba polohy A ve směru osy Z
<b>ENAC</b>	Entidad Nacional de Acreditacion
<b>ENC</b>	Encoder compensation
<b>FRB</b>	Full rigid body
<b>FRB+T</b>	Full rigid body + tilt
<b>FSI</b>	Fakulta strojního inženýrství
<b>f<sub>1</sub></b>	Referenční frekvence
<b>f<sub>2</sub></b>	Měřicí frekvence
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>HeNe</b>	Helium-Neon
<b>HSM</b>	High speed machining
<b>IAP</b>	Implementační akční plán
<b>IBSPE</b>	IBS Precision Engineering
<b>IFM</b>	Iterferometric measurement
<b>IOT</b>	Industrial internet of thinks
<b>IMT</b>	International Machine Tools
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>IWU</b>	Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik
<b>k</b>	Koeficient rozšíření
<b>KET</b>	Key Enabeling Technoliges
<b>KŠM</b>	Kuličkový šroub s maticí

<b>L</b>	Jmenovitá délka
<b>LEC</b>	Leadscrew error compensation
<b>LT</b>	Laser tracker
<b>LTc1</b>	LaserTRACER test 1
<b>LTc2</b>	LaserTRACER test 2
<b>M</b>	Rozsah průměrné obousměrné polohové chyby v ose
<b>MPE</b>	Maximální dovolená chyba
<b>MSEC</b>	Measuring systém error compensation
<b>MSV</b>	Mezinárodní strojírenský veletrh
<b>m1</b>	Hmotnost
<b>m2</b>	Hmotnost
<b>OMP</b>	doteková spínací 3D sonda
<b>OP VVV</b>	Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
<b>OS</b>	Obráběcí stroj
<b>PLC</b>	Programmable logic controller
<b>QERS</b>	Quality, Environment, Reliability and Safety
<b>R</b>	Obousměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose
<b>RIS3</b>	výzkumná a inovační strategie pro inteligentní specializaci
<b>RONt</b>	Total roundness
<b>s</b>	Směrodatná odchylka
<b>s<sub>g</sub></b>	Směrodatná odchylka
<b>SEA</b>	Spindel error analyzer
<b>SPC</b>	Statistické řízení procesu
<b>STU</b>	Slovenská technická univerzita v Bratislave
<b>T</b>	Tolerance
<b>TACR</b>	Technologická agentura České republiky
<b>TCP</b>	Tool center point
<b>TH1</b>	Taylor Hobson test 1
<b>TH2</b>	Taylor Hobson test 2
<b>TP SVT</b>	Technologická platforma Strojírenské výrobní techniky
<b>U</b>	Nejistota měření
<b>UVSSR</b>	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

<b>VaV</b>	Věda a výzkum
<b>VaVaI</b>	výzkum, vývoj a inovace
<b>VCS</b>	Volumetric systém compensation
<b>VDI</b>	Verein Deutscher Ingenieure
<b>v<sub>e</sub></b>	Volumetrická odchylka
<b>VUT</b>	Vysoké učení technické
<b>W</b>	obrobek
<b>WOS</b>	Web of Science
<b>WP1</b>	Workpiece test 1
<b>WP2</b>	Workpiece test 2
<b>x</b>	Označení pro osu X
<b>x<sub>e</sub></b>	Vypočtená poloha
<b>x<sub>i</sub></b>	Měřená poloha
<b>x<sub>meas</sub></b>	Měřená poloha v ose X
<b>x<sub>nom</sub></b>	Nominální poloha v ose X
<b>X0C</b>	Posunutí osy pivotu C ve směru osy X
<b>y</b>	Označení pro osu Y
<b>y<sub>meas</sub></b>	Měřená poloha v ose Y
<b>y<sub>nom</sub></b>	Nominální poloha v ose Y
<b>Y0A</b>	Posunutí osy pivotu A ve směru osy Y
<b>Y0C</b>	Posunutí osy pivotu C ve směru osy Y
<b>Z</b>	Označení pro osu Z
<b>z<sub>meas</sub></b>	Měřená poloha v ose Z
<b>z<sub>nom</sub></b>	Nominální poloha v ose Z
<b>Z0A</b>	Posunutí osy pivotu A ve směru osy Z
<b>Δf<sub>z</sub></b>	Dopplerova frekvence
<b>ΔTCP</b>	Odchylka na tool centre point
<b>Δx</b>	Odchylka v ose X
<b>Δy</b>	Odchylka v ose Y
<b>Δz</b>	Odchylka v ose Z



## ÚVOD

Předkládaná habilitační práce se zabývá problematikou zvyšování pracovní přesnosti obráběcích strojů pomocí nasazení progresivních technologií a pokročilých kompenzačních metod. Pracovní přesnost obráběcího stroje je posuzovaná na základě kvality výroby zkušebního obrobku, respektive sady zkušebních obrobků.

Celkový soubor faktorů ovlivňující výslednou volumetrickou odchylku CNC obráběcího stroje lze rozdělit například dle [1]. Jedná se o rozdělení na geometrické a kinematické chyby, teplotní chyby, chyby od řezných sil a chyby od upnutí. Z pohledu předložené práce je nezbytné věnovat pozornost všem výše uvedeným zdrojům chyb, přičemž hlavní část práce je věnována geometrickým a kinematickým chybám, způsobu měření geometrických a kinematických odchylek, jejich interpretaci a následnému přístupu pro jejich minimalizaci. Vzhledem k rozmanitosti kinematických struktur CNC obráběcích strojů je nezbytné v první řadě popsat geometrické a kinematické odchylky, které vychází z normy ČSN ISO 230-1: 2012. Další částí předložené práce je popis dostupné měřicí techniky se zaměřením na posouzení výsledné volumetrické odchylky vyjádřené pro celý pracovní prostor nebo vybranou část pracovního prostoru. Rozmanitost měřicí techniky a možnosti řídicích systémů CNC obráběcích strojů umožňují využívat stále komplexnější přístup pro hodnocení výsledné odchylky mezi nástrojem a obrobkem, ať už se jedná o statické, kvazi-statické či dynamiky děje ve výrobním procesu.

CNC obráběcí stroje dnes disponují velkým množstvím nástrojů pro kompenzaci negativních faktorů. V současné době tyto nástroje nabízí většina výrobců obráběcích strojů formou buď vlastně vyvinuté opce nebo formou využití funkcionalit řídicího systému stroje. Zde můžeme mluvit o tzv. opcích, které jsou nabízeny zákazníkům dle jejich potřeby, jsou součástí přidané hodnoty stroje a současně mohou být značnou konkurenční výhodou. Velmi častým faktorem nepořízení nových progresivních funkcionalit stroje bývají ale jejich vysoké pořizovací náklady a dlouhá doba uvedení na trh.

I přesto jsou softwarové kompenzace jedním z možných řešení, jak uspokojit neustále rostoucí požadavky zákazníků na přesnější a kvalitnější výrobu. Velkou roli hraje neustálý rozvoj výpočetní techniky (výkonnost a rychlost komunikace), kde u nových HW je možné využívat zpracování většího množství dat, aniž by došlo ke zpomalení interpolace mezi nástrojem a obrobkem. Právě vhodným využitím progresivních

technologií a metod lze zvýšit geometrickou přesnost obráběcích strojů až o 60 %, při zachování jejich výkonnosti [2].

Předložená práce je primárně zaměřena na vývoj vhodných metodických postupů, využívajících laserovou interferometrii, pro zvyšování pracovní přesnosti obráběcího stroje orientované na specifický výrobek. Vývoj metodických postupů je založen na multidisciplinárním přístupu, přičemž jednotlivé postupy jsou pro správnou funkci dále orientovány směrem k dosažení maximální pracovní přesnosti nebo na minimální čas pro zavedení pokročilých kompenzačních metod. Teoretické znalosti problematiky zvyšování geometrické přesnosti byly verifikovány na dvou případových studiích v laboratořích Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky (ÚVSSR), Fakulty strojního inženýrství v Brně (FSI) a validovány stroji průmyslových partnerů (TAJMAC-ZPS a.s., FERMAT CZ s. r. o.). Jedna z prvních volumetrických kompenzací založené na laserové interferometrii v ČR byla realizována na třiosém vertikálním obráběcím centru MCV 754QUICK v laboratořích ÚVSSR s výsledným efektem zlepšení volumetrické přesnosti okolo 85 %. Právě efektivní využívání nových technologií a znalostí z nich získaných představují vysoký potenciál k dalšímu zvyšování výrobní přesnosti a produktivitě.

Struktura předložené habilitační práce věnované problematice zvyšování pracovní přesnosti CNC obráběcích strojů je rozdělena do následujících kapitol. Motivaci řešení daného tématu (kapitola 2), popisu současného stavu poznání v oblasti pracovní přesnosti CNC obráběcích strojů (kapitola 3), popisu současného stavu a vlastního přínosu v oblasti volumetrické přesnosti CNC obráběcích strojů (kapitola 4), popisu současnému stavu a vlastního přínosu v oblasti softwarových kompenzací CNC obráběcích strojů (kapitola 5), vlastního přínosu v oblasti využití pokročilých softwarových kompenzací (kapitola 6), zvyšování pracovní přesnosti pomocí volumetrických kompenzací (kapitola 7), dalších postupů pro zvyšování výrobní přesnosti (kapitola 8), zhodnocení předkládané habilitační práce (kapitola 9) a závěr (kapitola 10).

Dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách § 72 Habilitační řízení je předkládaná habilitační práce kompilována jako soubor uveřejněných vědeckých prací nebo inženýrských prací doplněný komentářem.

## MOTIVACE

Neustálý tlak na zvyšování kvality výroby v oblastech „nulová výroba neshodných dílců“ (Zero defect manufacturing), „výroba velkých součástí“ (Large volume manufacturing) a „přesné strojírenství“ (Precision Engineering), kladou vysoké požadavky na výrobu přesných výrobních strojů. Česká republika má dlouholetou tradici v oblasti výroby obráběcích strojů a zařízení, přičemž dnes zde nalezneme velké množství výrobců středně velkých a velkých CNC obráběcích strojů.

Výše uvedené oblasti jsou zdůrazňovány, nejen legislativou EU, například na snižování energetické náročnosti výroby a snižování dopadů na životní prostředí, tak i v rámci předložených dlouhodobých strategií rozvoje v oblasti strojírenství České republiky. Dále jsou to požadavky na výrobu stále rozměrnějších součástí, které jsou požadovány např. pro energetický průmysl, letecký, lodní a kosmický průmysl, přesnou výrobu ve zdravotnictví, výrobu elektrotechniky, ale také pro automobil a kolejovou dopravu.

Jednou ze základních oblastí průmyslové výroby je třískové obrábění, kde hlavními sledovanými parametry jsou shoda rozměrů vyrobené součásti s příslušnou dokumentací a produktivita stroje. Dosažení co nejtěsnější shody mezi obrobkem a požadovanými rozměry je cílem nejen všech výrobců obráběcích strojů, ale také jejich uživatelů. Naplňování tohoto cíle je kontinuálně podporováno zaváděním nových technologií do výrobních procesů. Zavádění nových technologií do výroby je podporováno i ze strany Národní výzkumné a inovační strategie České republiky, a to v úzké vazbě na Národní politiku v oblastech výzkumu, vývoje a inovací (dále jen VaVaI). V této souvislosti vznikl komplexní koncepční dokument orientovaný na aplikovaný výzkum v České republice (Národní RIS3 strategie pro roky 2014–2020). Mezi výzkumnou a ekonomickou specializací ČR, která je v souladu s Key Enabling Technologies (dále jen KETs) lze zahrnout i „pokročilé výrobní technologie“. Tato část zahrnuje velmi širokou paletu témat. Mezi technicky nejnáročnější strojírenské obory, na které jsou kladeny extrémní nároky na přesnost, kvalitu, ale také produktivitu a spolehlivost, jsou obory „Machine Tools“ a „Precision Engineering“. Zpravidla se jedná o primární výrobu, jejíž produkty jsou navázány na další strojírenská odvětví zpracovatelského průmyslu. V dokumentu RIS3 [3] je pro výše uvedené obory provedena identifikace potřeb a návrh jejich řešení, kde strategie těchto oborů pro posilování konkurenceschopnosti uvádí

v prvním bodě „Zvyšování přesnosti – především zvyšování geometrické a rozměrové přesnosti v malých i velkých rozměrech dílců, komponentů, strojů a metod“ [3].

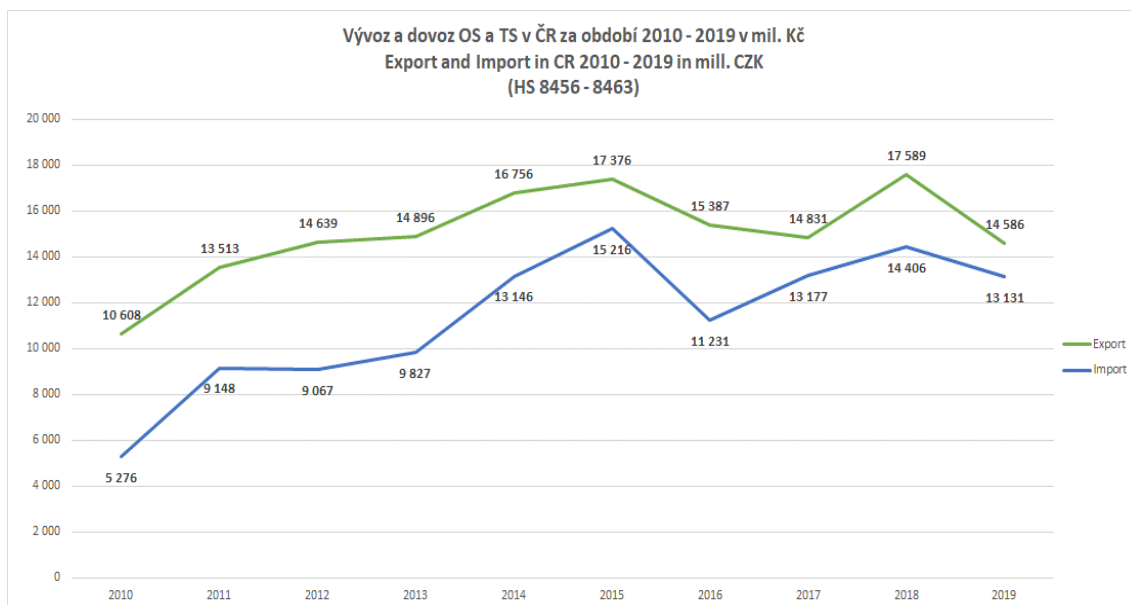
Dalším strategickým dokumentem v oboru strojírenské výrobní techniky je „Implementační akční plán oboru pro období 2020-2025+“ [4]. Účelem IAP (Implementačního akčního plánu) je formulovat konkrétní návrhy výzkumných témat s cílem naplňování úkolů oborové strategie. V rámci oblasti obráběcích strojů a obrábění jsou doporučena IAP výzkumná témata (T22) Zvyšování přesnosti stavby strojů a (T46) Kompenzace nepřesnosti víceosých frézovacích center. Obě z výše uvedených témat spadají pod obory „Machine Tools“ a „Precision Engineering“, KETs „pokročilé výrobní technologie“, identifikace potřeb „Zvyšování přesnosti – především zvyšování geometrické a rozměrové přesnosti v malých i velkých rozměrech dílců, komponentů, strojů a metod“ popsané v RIS3. Řešené téma v rámci předložené práce spadá svým obsahem do IAP pro roky 2020-2025+ [4].

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky (dále ÚVSSR) se aktivně zapojuje v rámci své činnosti a členství v Technologické platformě Strojírenské výrobní techniky (TP SVT) a Centra kompetence Strojírenské výrobní techniky (CK SVT) na formování Národní oborové strategie formou přípravy IAP 2020-2025+. Téma předložené práce je logicky v synergii s Oborovou strategií ÚVSSR, IAP a také RIS3 [5].

Právě rozvoj výzkumných témat řešených v synergii s výše uvedenými strategiemi mají vysoký potenciál na jejich uplatnění na trhu a zvýšení konkurenceschopnosti českých firem.

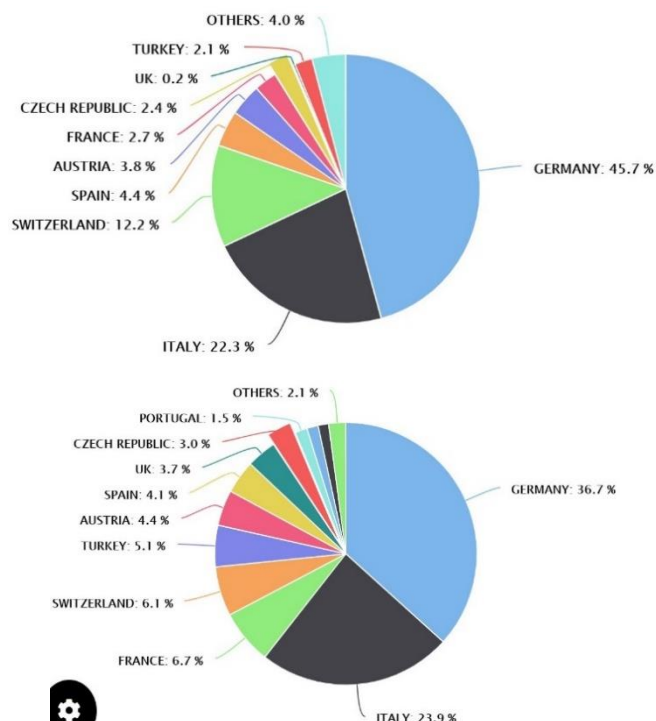
V oboru „Machine Tools“ a „Precision Engineering“ lze očekávat pro zvyšování užitných vlastností strojů nutnost nasazení hi-tech řešení s vysokou přidanou hodnotou. Na ÚVSSR došlo v roce 2012 k pořízení klíčových technologií, na jejichž základě je možné řešit úkoly v rámci strategií RIS3, IAP a dlouhodobě podporovat zvyšování konkurenceschopnosti firem aplikovaným výzkumem v oblasti zvyšování pracovní přesnosti CNC obráběcích strojů a výrobní přesnosti u uživatelů CNC obráběcích strojů.

Česká republika patří k významným producentům velkých obráběcích strojů. Vývoz a dovoz obráběcích a tvářecích strojů je zobrazen na obr. 1 .



obr. 1 Vývoz a dovoz OS a TS v ČR [sst.cz]

Na obr. 2 je znázorněna produkce a spotřeba obráběcích strojů a souvisejících technologií v rámci asociace CECIMO (European Association of the Machine Tool Industries and related Manufacturing Technologies). Česká republika se podílí na produkci 2,4 % z 26 miliard EUR za rok 2018 a na spotřebě 3,0 % z 16 miliard EUR za rok 2018.



obr. 2 Produkce a spotřeba obráběcích strojů v rámci CECIMO [CECIMO.eu]

Předložená práce je zaměřena na oblast zvyšování pracovní přesnosti CNC obráběcích strojů. Toto téma je globálně řešeno celou řadou výrobců obráběcích strojů a výzkumných

pracovišť po celém světě. Zvyšování pracovní přesnosti strojů je možné dosáhnout celou řadou postupů. Jedná se o nasazení konvenčních způsobů měření a kompenzací strojů až po zavádění korekcí založených na matematických modelech navržených pro konkrétní měřicí zařízení a obráběcí stroje. Zpravidla náročnost přípravy modelu, nedostupnost měřicího zařízení a nepřipravenost řídicích systémů zabraňuje dalšímu nasazení těchto řešení v průmyslové praxi.

Tato práce si klade za cíl využít konvenční i pokročilé technologie dostupné na trhu (měřicí technika, funkce řídicích systémů apod.) a sestavit metodický postup, kterým by bylo dosaženo požadované zvýšení pracovní přesnosti. Současně si klade za cíl věnovat se problematice okrajových podmínek, mezi které patří např. okolní podmínky, technické omezení strojů a zařízení apod.

Nové metodické postupy mají vést k postupnému zavádění nových pokročilých technologií do průmyslových aplikací.

Předložená habilitační práce představuje soubor znalostí získaných během dlouhodobé spolupráce s průmyslovým sektorem, kde byla spolupráce realizována formou výzkumné nebo hospodářské činnosti. Mezi nejvýznamnější spolupracující firmy je možné zařadit výrobce obráběcích strojů jako TOSHULIN, a. s., TOS KUŘIM-OS, a. s., ŠKODA MACHINE TOOLS, a. s., TOS VARNDSDORF, a. s., FERMAT CZ, s. r. o., TAJMAC-ZPS, a. s., TOS ČELÁKOVICE – Slovákcké strojírny, a. s. Část práce byla věnována výrobcům velkých obrobků, mezi které lze řadit SLOVÁCKÉ STROJÍRNY a. s. – UHERSKÝ BROD a VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY, a. s.

# 1 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ V OBLASTI PRACOVNÍ PŘESNOSTI OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

*Tato kapitola shrnuje a komentuje výsledky dlouhodobého výzkumu na ÚVSSR v oblastech geometrické, volumetrické, pracovní a výrobní přesnosti. Prezentované výsledky vznikly spoluprací autorů Ing. Michal Holub Ph.D., prof. Dr. Ing. Jiří Marek, doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D., doc. Ing. Róbert Jankových, CSc., Ing. Josef Knobloch M.Sc., Ing. Tomáš Marek, Ph.D., Ing. Jan Vetiška, Ph.D. (s autorovým podílem) [6] (100 %), [7] (30 %), [8] (50 %), [9] (30 %), [10] (30 %).*

## 1.1 DEFINICE A NÁZVOSLOVÍ

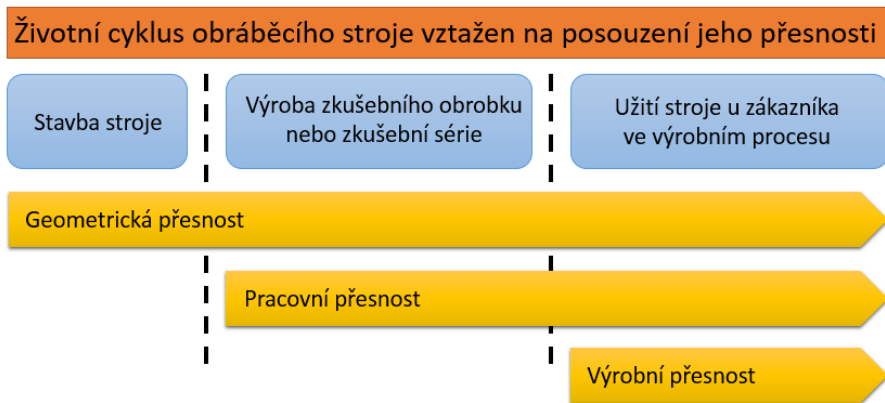
Pod pojmem přesnost obráběcích strojů si může každý představit hned několik dílčích vlastností stroje. Přesnost bude brána jinak z pohledu konstruktéra a jinak z pohledu metrologa.

Z pohledu metrologie přesnost popisuje, jak blízko je příslušný výsledek měření k pravé hodnotě veličiny [11]. V oblasti obráběcích strojů se můžeme bavit o několika typech přesnosti, přičemž stanovení přesnosti je pouze kvalitativní (malá, střední, vysoká). Jedná se o geometrickou, pracovní a výrobní přesnost obr. 3. Každá z uvedených typů přesností má své opodstatnění v životním cyklu stroje.

*Geometrická přesnost* obráběcího stroje se váže ke kvalitě konstrukce, výrobě jednotlivých komponent a montáži obráběcího stroje.

*Pracovní přesnost* se vztahuje k posouzení kvality stroje vzhledem ke zkušebním cyklům v pracovním režimu stroje (obrábění za definovaných podmínek) za zkušebním obrobku nebo sérii zkušebních obrobků. Tento proces se může opakovat i v životním cyklu stroje, a to jeho užití, při opětovném seřizování dodavatelem stroje nebo pověřeným servisem.

*Výrobní přesnost* ve vztahu k celému výrobnímu procesu již u zákazníka a dlouhodobé stability geometrické a pracovní přesností.



obr. 3 Posouzení přesnosti CNC obráběcího stroje v jeho životním cyklu [10]

*Zkoušení vlastností se podrobuje každý obráběcí stroj dodávaný výrobcem, ať už jde o nový výrobek, nebo o stroj po generální opravě. Zkoušky se vykonávají podle předepsaných norem a postupů. [12]*

U obráběcího stroje lze konstatovat, že stroj má malý, střední nebo vysoký stupeň výrobní přesnosti. Toto posouzení vychází zpravidla z hodnot měřených na obrobkách. U obrobků s tolerancí lepší než 0,04 mm nelze říci, že stroj má malou, střední nebo vysokou výrobní přesnost. V tab. 1 je uveden přehled dosažované tolerance na obrobku dle velikosti stroje. Pro malý a středně velký stroj tedy znamená, že dosažená shoda při požadované toleranci na obrobku 0,04 mm odpovídá stupni střední přesnosti stroje. U velkého CNC obráběcího stroje se již jedná o vysoký stupeň výrobní přesnosti. Je tedy nutné rozlišovat, v jaké třídě velikosti strojů se zrovna nacházíme, ale také v jakém se nacházíme časovém období. Vývoj přesnosti obráběcích strojů predikoval Taniguchi již v roce 1983 [13]. Pro frézování byla pro rok 2000 predikována hodnota dosažení pracovní přesnosti 5  $\mu\text{m}$  a pro technologii broušení až 1  $\mu\text{m}$ . tab. 1 je představen stav k roku 2016 a reprezentuje hodnoty stanovené pro technologii frézování.

tab. 1 Stupeň výrobní přesnosti dle velikosti stroje [14]

	Pojezd nejdelší osy [mm]	Hmotnost obrobku [kg]	Tolerance dosažená na obrobku [mm]	Stupeň výrobní přesnost [-]
Malé CNC obráběcí stroje	< 999	< 999	> 0,05	nízký
			0,01	střední
			0,001	vysoký
Středně velké CNC obráběcí stroje	1000–3999	1000–9999	> 0,09	nízký
			0,04	střední
			0,006	vysoký
Velké CNC obráběcí stroje	> 4000	> 10000	> 0,3	nízký
			0,1	střední
			0,04	vysoký



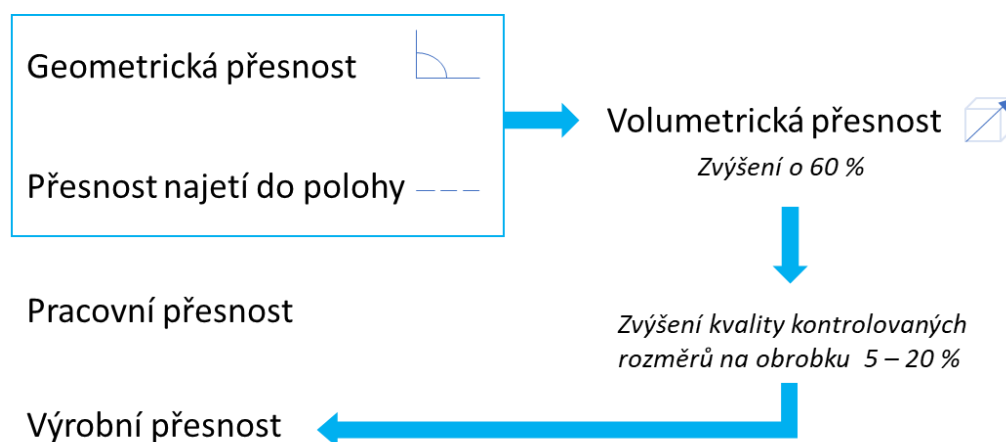
Pro koncového uživatele stroje má vysokou vypovídající hodnotu parameter právě výrobní přesnost. Ten má přímou vazbu na obrobek, případně výrobní spektrum obrobků.

Při předávání nového stroje zákazníkovi je důležitý parameter pracovní přesnost stroje. Pracovní přesnost se posuzuje na konkrétním obrobku, nejčastěji na obrobku zákazníka. Pracovní režim (obrábění) probíhá za definovaných podmínek, mezi které patří:

- okolní prostředí,
- řezný proces,
- přípravky pro upnutí obrobku,
- definované nástroje.

Geometrická přesnost slouží k posouzení jeho budoucí funkčnosti. Geometrickou přesností lze jednoduše ověřit správnost výroby jednotlivých dílů stroje, jejich montáž a výsledné seřízení stroje.

Na obr. 4 je znázorněn systémový přístup ke zvyšování výrobní přesnosti pomocí geometrické přesnosti. Zvýšení výrobní přesnosti o 5–20 % (vztaženo k tolerancím na obrobku) je možné docílit zvýšením volumetrické přesnosti. V tomto případě bylo dosaženo zlepšení volumetrické přesnosti stroje o 60 % a jedná se o data získané v rámci průmyslové aplikace konkrétního obráběcího centra a jeho specifickém výrobním provozu [6]. Velikost uvedeného rozptylu výrobní přesnosti je ovlivněna především velikostí rozměrové a geometrické tolerance na obrobku a velikostí prostoru, ve kterém probíhá samotný proces obrábění.



obr. 4 Vliv volumetrické přesnosti na výrobní přesnosti [6]

## 1.2 GEOMETRICKÁ PŘESNOST

Geometrická přesnost je jeden z parametrů obráběcího stroje, který popisuje kvalitu výroby a montáže stroje v nezatíženém stavu (neuvažují se síly od obrábění). Pod geometrickou přesností si můžeme představit [15]:

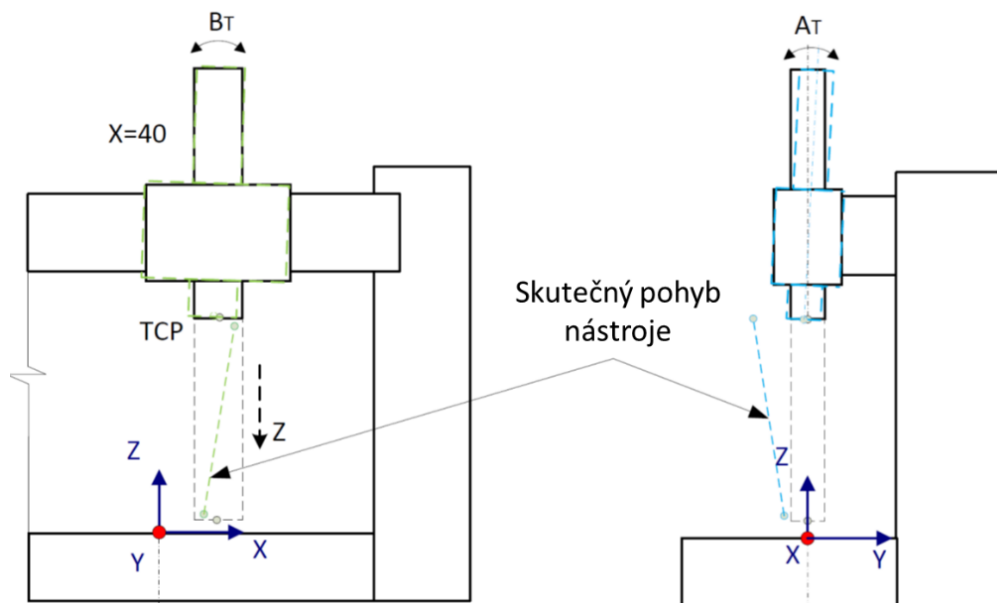
- odchylky tvaru a polohy upínacích ploch pro obrobky a nástroje,
- relativní polohu mezi obrobkem a nástrojem při definovaném vzájemném nastavení jednotlivých částí stroje, při jejichž změně dochází během pracovního posuvu nebo při přestavování jejich poloh.

Geometrická přesnost tedy popisuje geometrickou strukturu obráběcího stroje, ze které je možné vyhodnotit vlastnosti funkčních částí, ovlivňující dále jeho pracovní a výrobní přesnost. Zkoušky geometrické přesnosti jsou popsány řadou norem ČSN ISO 230. Zde je uvedeno, že se jedná o zkoušky prováděné v nezatíženém stavu stroje nebo za dokončovacích podmínek obrábění.

Teoretické základy těchto zkoušek formuloval již v roce 1927 profesor Georg Schlesinger [16]. Jedná se o zkoušky prováděné konvenčními měřidly, mezi které patří průměrná pravítka, kontrolní trny, číselníkové úchylkoměry, kolimátory, libely apod. Postupy navržené profesorem Schlesingerem jsou používány dodnes.

Na obr. 5 je schematicky zobrazena kontrola výsuvu smykadla u svislého soustruhu. Tato zkouška je prováděna přístrojem Laser Tracker a cílem této zkoušky je získat informaci o směru a velikosti odchylky TCP (Tool Center Point) vůči obrobku upnutému na desce stolu. Využívání samonaváděcích trackovacích zařízení je efektivním řešením, a to jak v oblasti kontroly obráběcích strojů, tak i obrobků.

Vzhledem k nejistotě měření Laser trackerů se v současné době jedná spíše o oblast velkých obráběcích strojů a velkých obrobků.



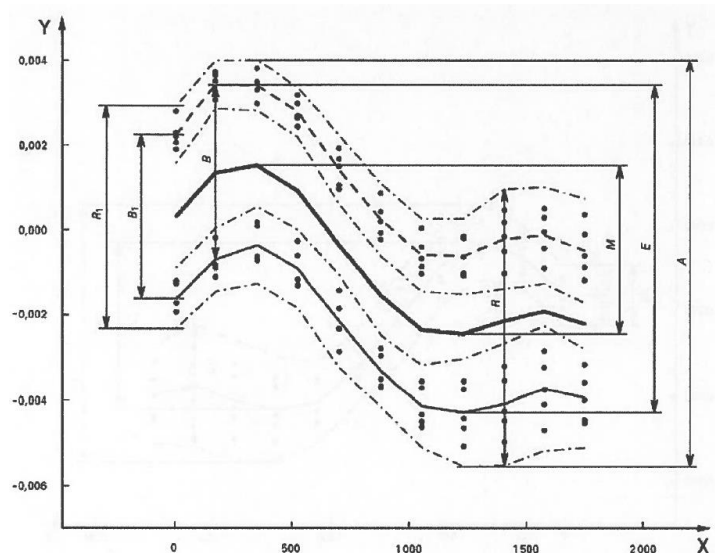
obr. 5 Vyhodnocení chyby výsuvu smykadla [17]

### 1.3 PŘESNOST A OPAKOVATELNOST NAJETÍ DO POLOHY

Tento parametr popisuje přesnost a opakovatelnost najetí do polohy u lineárních a rotačních číslicově řízených os. „Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách“ je popsáno normou ČSN ISO 230-2:2015 a ČSN ISO 230-6:2003 (ISO 230-2:2015 Test code for machine tools – Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes; ISO 230-6:2003 Test code for machine tools - Determination of positioning accuracy on body and face diagonals), ale velmi často se využívá i směrnice VDI/DGQ 3441. Postup měření a vyhodnocení zkoušky najetí do polohy jsou podrobně popsány v publikacích a příslušných normách, např. [12], [18], [19].

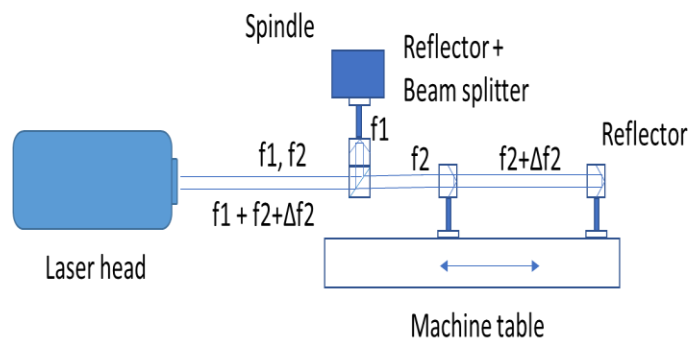
Na obr. 6 Dvoustranná přesnost a opakovatelnost nastavení polohy [20] je znázorněna ukázkou a schémou měření pomocí laser interferometru XL80 od firmy RENISHAW. Mezi posuzované parametry zkoušky dle ISO 230-2: 2015 patří:

- dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose  $A$ ,
- dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze  $R$ ,
- necitlivost v ose  $B$ ,
- dvoustranná systematická polohová úchylka v ose  $E$ ,
- průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose  $M$ .



obr. 6 Dvoustranná přesnost a opakovatelnost nastavení polohy [20]

Tato zkouška se standardně dělá pro všechny lineární a rotační řízené osy ve fázi stavby stroje, ale také ve fázi užití stroje. Zpravidla se pro tyto aplikace využívají laserové interferometry obr. 7.



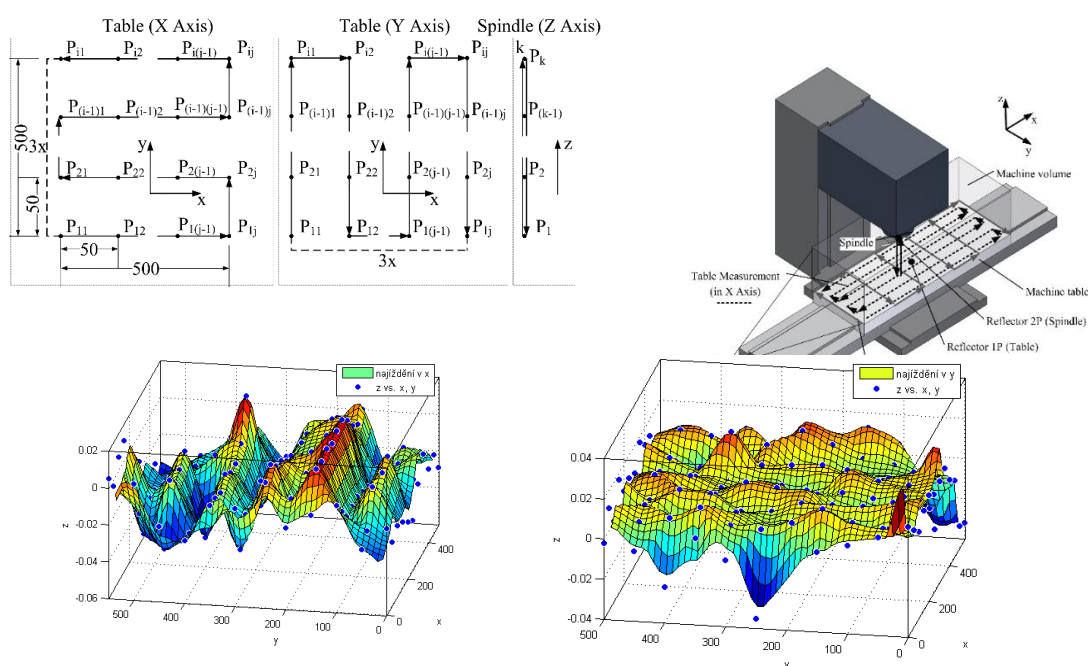
obr. 7 Aplikace laser interferometru – výše, princip laser interferometru – níže [6]

Geometrickou přesnost stroje a přesnost najetí do polohy je možné vyhodnotit současně u již smontovaného a zprovozněného stroje. Z tohoto důvodu jsou obvykle výše uvedené přesnosti posuzované současně.

Pro toto vyhodnocení je možné využívat celou řadu měřicích zařízení a postupů. Postupy vychází z norem ČSN ISO 230-1:2014 a ČSN ISO 230-2:2015.

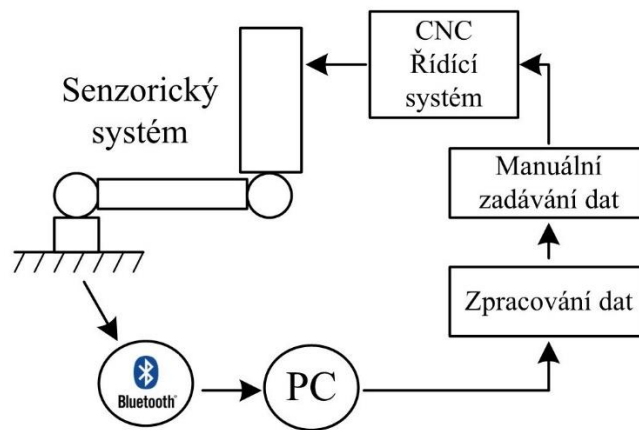
Mezi pokročilé zařízení pro měření geometrické přesnosti stroje lze zařadit zařízení Laser tracker, které umožňuje okamžité vyhodnocení odchylky bodu v prostoru  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  a  $\Delta z$ .

Takovéto postupy byly aplikovány na stroji MCFV 1260 ve firmě TOSHULIN, a. s., které byly publikovány po názvem „Laser tracker measurement for prediction of workpiece geometric accuracy“. Ukázka návrhu strategie měření a vyhodnocení je zobrazena na obr. 8.



obr. 8 Ukázka přístupu měření a vyhodnocení přístrojem Laser tracker [7]

Další možný přístup je založen na využití zařízení sloužící pro komplexnější diagnostiku CNC obráběcích strojů, mezi které lze zařadit Ballbar. Princip zkoušky vychází z požadavků dle normy ČSN ISO 230-4:2010 a je rozšířen o tzv. expertní softwarovou část. To umožňuje uživateli dělat komplexnější analýzy stroje. Přístup byl popsán v [9] a je schematicky zobrazen na obr. 9. Předpokladem pro zavádění online a quasi-online kompenzace je dostatečná znalost stroje a jeho interakce s okolím. Všestrannost zařízení Ballbar QC20-w vytváří vhodný předpoklad pro takovéto nasazení.

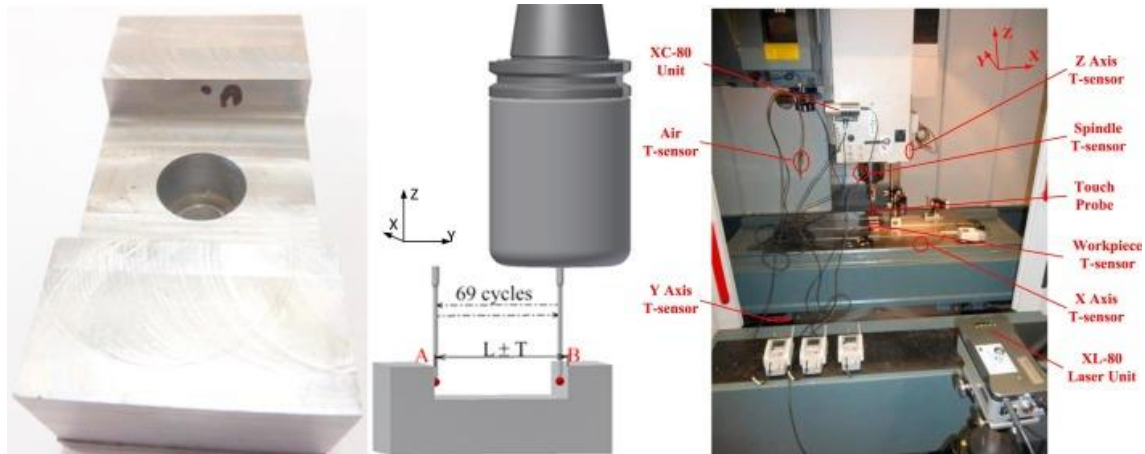
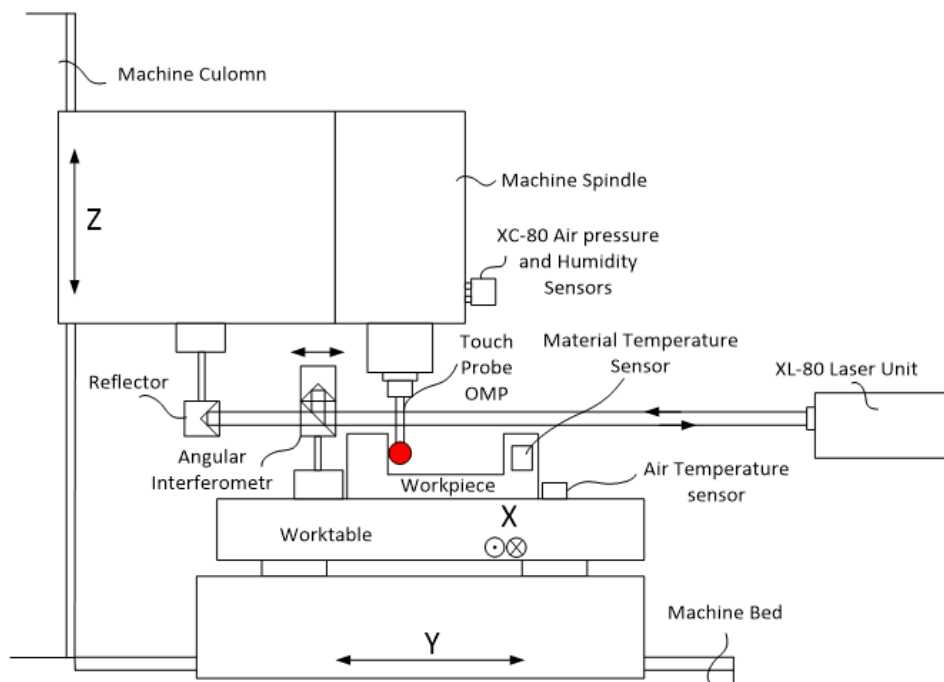


obr. 9 Princip měření a zadávání dat se senzorickým systémem Ballbar QC20-w [9]

Možnost nasazení online nebo quasi-online kompenzací představuje vysoký potenciál jak v oblasti zvyšování výrobní přesnosti stroje, tak v oblasti in procesní kontroly vybraných parametrů stroje. Toho může být například využito při posuzování stroje jako měřicího zařízení. Takovýto přístup byl aplikován na velkém portálovém stroji ve výrobních prostorách Vítkovice Heavy Machinery a příslušný metodický postup byl publikován v časopise Measurement pod názvem „Capability assessment of CNC machining centers as measuring devices“ [8].

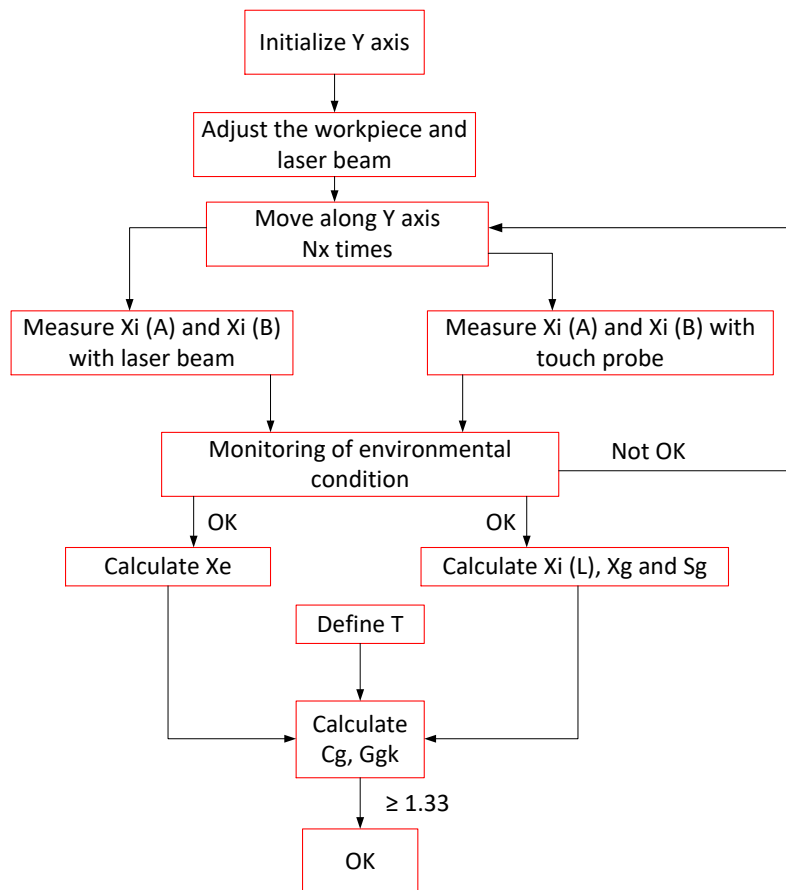
Experiment popsáný v publikaci [8] byl navržen pro ověření přesnosti měření délky  $L$  obrobku pomocí obrobkové sondy na stroji MCV 754QUICK umístěném v laboratořích ÚVSSR. Experiment byl koncipován jako jednoosé měření. V realizovaném experimentu byla posuzována osa  $Y$  obráběcího stroje. Měřená délka  $L$  obrobkovou sondou byla kontrolována měřicím zařízením laser interferometr XL-80, který zde byl použit jako etalon. Pro přesné odečítání aktuálně změřené polohy byl laserový interferometr synchronizován s výstupním digitálním signálem obrobkové sondy OMP (Renishaw) z řídicího systému obráběcího stroje. Pomocí této synchronizace (spínací trigerovací signál) docházelo k paralelnímu změření polohy bodů  $A$  a  $B$  obrobkovou sondou a laser interferometrem na obrobku (Workpiece), obr. 10. Experiment byl navržen s cílem středně dlouhého cyklu měření o délce 60 min., kterému odpovídalo získání celkem 69 hodnot polohy pro body  $A$  a  $B$ , jak z obrobkové sondy OMP, tak i z laserového interferometru. Měření obrobkovou sondou je tedy provedeno v následujícím experimentu pro osu  $Y$  dle následujícího schématu. Měření bylo provedeno na teplotně temperovaném stroji, který před experimentem prošel zahřívacím cyklem strojních os  $X$ ,  $Y$  a  $Z$  a vřetene. Cílem teplotní stabilizace bylo dosáhnout na stroji minimálních změn

teplot, které by neměly přesáhnout hodnoty změny  $1\text{ }^{\circ}\text{C/hod}$ . Tím byla zajištěna dostatečná opakovatelnost najetí do žádané polohy stroje a provozní stav stroje lépe odpovídal stavu stroje zatíženého procesem obrábění při výrobě.



obr. 10 Schéma zkoušky měření přesnosti obráběcího stroje [8]

Postup pro ověření způsobilosti obráběcího stroje jako měřicího zařízení je zobrazen na obr. 11 a odpovídá vyhodnocení osy  $Y$  dle schématu na obr. 10. Podstatný bod pro správné vyhodnocení způsobilosti procesu je monitorování okolního prostředí, které je důležité pro zajištění opakovatelnosti měření. Z výsledných měření jsou vypočteny hodnoty  $c_{gk}$  a  $c_g$ , které iteračním výpočtem definují minimální toleranční pole  $T$  kontrolovaného rozměru  $L$ .



obr. 11 Vývojový diagram stanovení tolerančního pole - T [8]

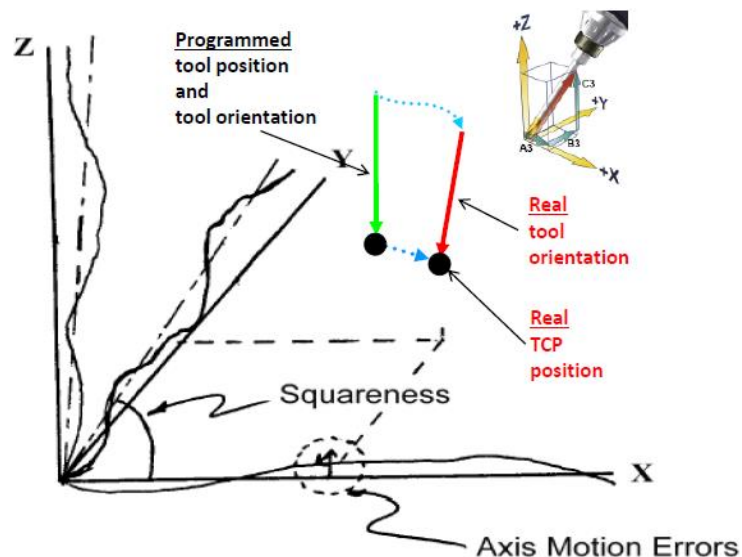
## 1.4 VOLUMETRICKÁ PŘESNOST

Mezi pokročilé a vysoce progresivní metody v oblasti přesné výroby patří identifikace volumetrické přesnosti a její následná kompenzace. Smyslem těchto pokročilých kompenzací je minimalizovat odchylku v prostoru TCP v libovolném bodě měřeného prostoru stroje [20]. Volumetrická odchylka TCP je definovaná jako součet dílčích odchylek v jednotlivých osách [21].

$$v_e = \frac{\sum_i^n \sqrt{(x_{nom} - x_{meas})^2 + (y_{nom} - y_{meas})^2 + (z_{nom} - z_{meas})^2}}{n} \quad (1)$$

Grafická interpretace volumetrické odchylky je znázorněna na obr. 12. Jedná se o rozdíl mezi programovanou polohou TCP a orientací a reálnou polohou TCP a orientací. Jak je patrné, tak odchylka vzniká nedokonalostí mechanismu v každé ose a vzájemně poloze dvou os. Na základě dostatečných znalostí jednotlivých chyb je možné výslednou chybu TCP korigovat.



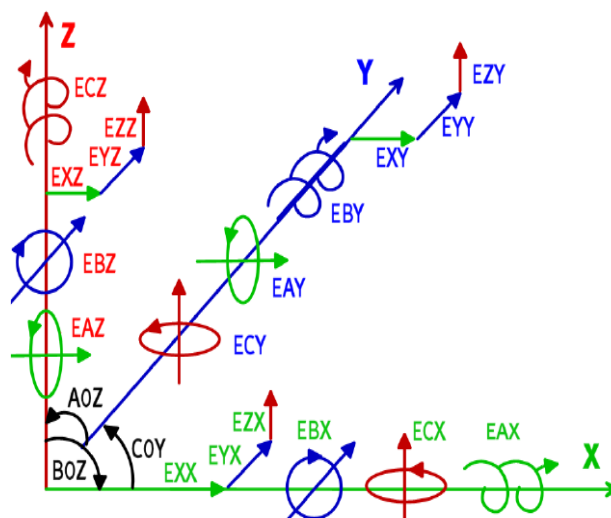


obr. 12 Interpretace volumetrické chyby v kartézském souřadném systému [SIEMENS]

U tříosého stroje je možné popsat 21 geometrických chyb stroje. Tento počet vychází z počtu stupňů volnosti (DOF) osy v prostoru. Značení geometrických chyb je značeno dle ISO 841:2001.

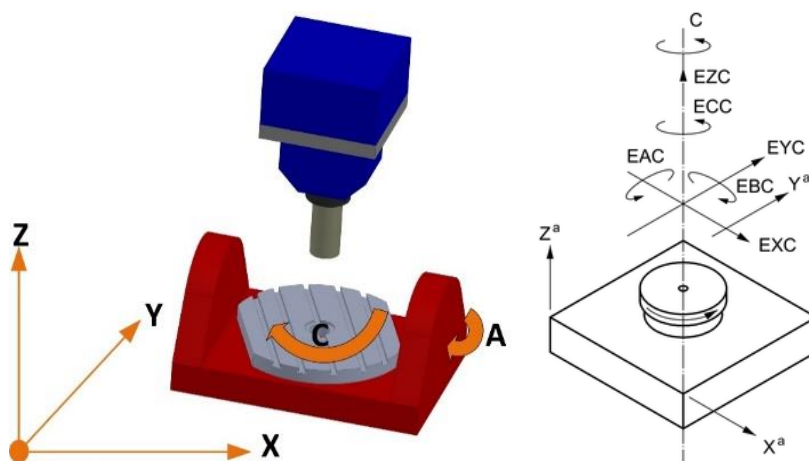
Pro tříosý obráběcí stroj se jedná o následující chyby (obr. 13):

- chyby polohy v osách ( $E_{XX}$ ,  $E_{YY}$ ,  $E_{ZZ}$ ),
- chyby přímočarostí v osách ( $E_{YX}$ ,  $E_{ZX}$ ,  $E_{XY}$ ,  $E_{ZY}$ ,  $E_{XZ}$ ,  $E_{YZ}$ ),
- úhlové chyby v osách ( $E_{AX}$ ,  $E_{BX}$ ,  $E_{CX}$ ,  $E_{AY}$ ,  $E_{BY}$ ,  $E_{CY}$ ,  $E_{AZ}$ ,  $E_{BZ}$ ,  $E_{CZ}$ ),
- chyby kolmosti ( $E_{COY}$ ,  $E_{AOZ}$ ,  $E_{BOZ}$ ).



obr. 13 Schematické znázornění 21 geometrických chyb stroje

Pětiosý obráběcí stroj je možné popsat 43 parametry složenými z geometrických a kinematických chyb. K již představeným 21 geometrickým chybám od tříosé kinematiky stroje, je nutné připočítat dalších 22 chyb. Na obr. 14 je zobrazeno uspořádání dvou rotačních os v obrobku (typ BK) a dále geometrické chyby rotační osy s označením C.



obr. 14 Kinematická dvojice – BK [Marek T.], geometrické chyby C-osy [ISO 230-7:2006]

Kinematická rotační dvojice má potom následující chyby:

- úhlové chyby polohy ( $E_{CC}$ ,  $E_{AA}$ ),
- axiální posunutí ( $E_{ZC}$ ,  $E_{XA}$ ),
- radiální posunutí ( $E_{XC}$ ,  $E_{YC}$ ,  $E_{YA}$ ,  $E_{ZA}$ ),
- chyby naklopení ( $E_{AC}$ ,  $E_{BC}$ ,  $E_{BA}$ ,  $E_{CA}$ ),
- chyby kolmosti ( $E_{AOC}$ ,  $E_{BOC}$ ,  $E_{COC}$ ,  $E_{AOA}$ ,  $E_{BOA}$ ,  $E_{COA}$ ),
- chyby polohy ( $E_{XOC}$ ,  $E_{YOC}$ ,  $E_{YOA}$ ,  $E_{ZOA}$ ).

V součtu lze chyby přiřadit dle tab. 2, a to na chyby přiřazené k lineárním osám, rotačním osám, a dále na chyby os a chyby polohy os. Celkově se tedy jedná pro pětiosou kinematiku o 43 chyb.

tab. 2 Součet chyb pro pětiosé obráběcí stroje

	<i>chyby os</i>	<i>chyby polohy</i>	<i>celkem</i>
3 lineární osy	18	3	21
2 rotační osy	12	10	22
celkem	30	13	43

## 1.5 KVAZI-STATICKE CHYBY

Kvazistatické chyby jsou definovány jako chyby relativní polohy TCP a obrobku, přičemž se chyby v čase mění pomalu. Tyto chyby přímo souvisí se samotnou strukturou obráběcího stroje a dají se rozčlenit na geometrické, kinematické a teplotní chyby. V publikaci [22] se do kvazi-statických chyb počítají i chyby dynamické, které se do relativní polohy TCP a obrobku promítají velmi pomalu. Geometrické chyby jsou ovlivněny výrobou jednotlivých komponentů stroje a tvoří strukturu stroje, jak bylo popsáno v úvodu kapitoly. Kinematické chyby jsou potom chyby závislé na směru pohybu, poddajnosti stroje a zahrnují i teplotní dilatace jednotlivých dílů. Dle prof. Rameshe [23] je podíl kvazistatické chyby 60–70 % na celkové pracovní přesnosti stroje. Zde se jednalo převážně o tříosé obráběcí centra. Prof. Ibaraki [24] tento odhad ještě rozšířil v rámci provedených zkoušek u pětiosých obráběcích center, kde tvrdí, že podíl kvazistatických chyb je ještě vyšší, až 80 %.

V souvislosti s rozvojem nových technologií pro posuzování geometrické přesnosti strojů lze očekávat, že výše uvedené podíly složek geometrických chyb mohou být eliminovány na základě využití nových postupů. Návrhy metodických postupů pro snižování velikosti geometrických chyb je součástí předložené práce.

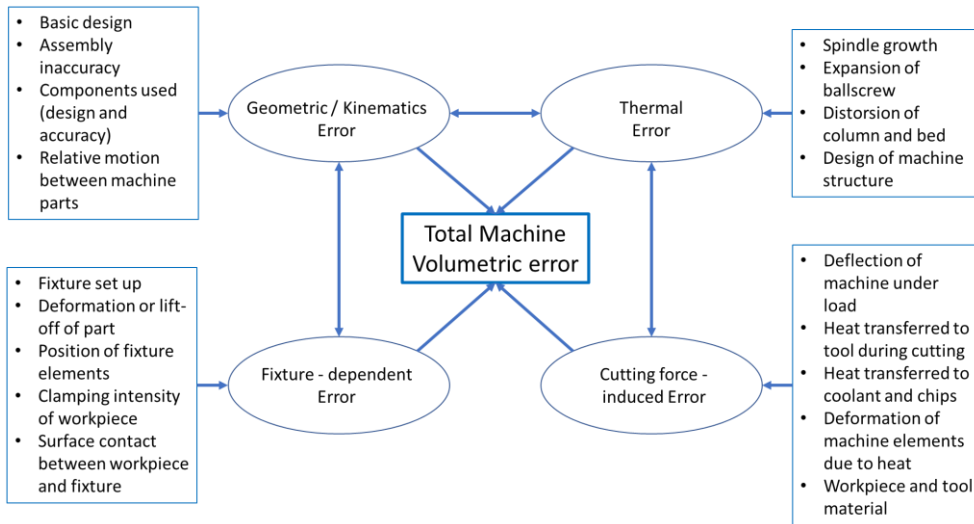
## 1.6 PRACOVNÍ PŘESNOST

Jedná se o vlastnost obráběcího stroje, která vyjadřuje, s jakou kvalitou a produktivitou může být obrobek vyroben. Pracovní přesnost je vyjádřena na základě výroby zkušebního obrobku nebo série zkušebních obrobků.

Pracovní přesnost stroje je ovlivňována:

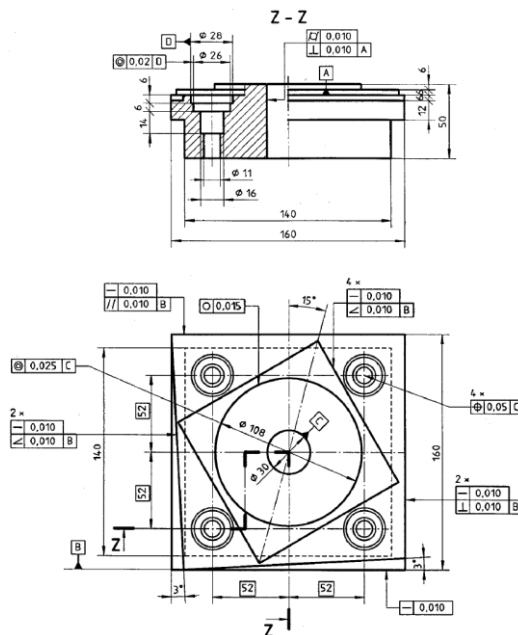
- přesností relativní dráhy nástroje,
- geometrickou přesností stroje,
- přesností nastavování polohy nástroje vzhledem k obrobku (přesnost polohování),
- odolností stroje vůči pružným deformacím (vyvolaných řeznými silami, hmotností obrobku apod.),
- robustností stroje vůči teplotním dilatacím („teplotní stabilita“),
- volbou řezných podmínek apod.

Celkový souhrn faktorů ovlivňující přesnost obráběcího stroje je zobrazen na obr. 15. Výsledná chyba se v kartézském souřadném systému projeví dle rovnice 1 jako prostorová chyba mezi programovanou (požadovanou) a skutečnou polohou TCP obr. 12).



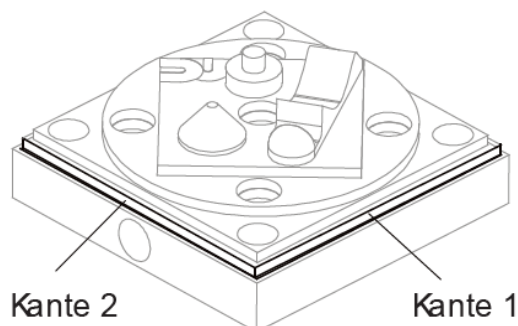
obr. 15 Přehled faktorů ovlivňující výslednou volumetrickou odchylku [1]

Zkušební obrobky pro ověření pracovní přesnosti jsou dány například normou ČSN ISO 10791-7:2020. Zde je navržen zkušební obrobek pro obráběcí stroje pracujících ve třech osách obr. 16.



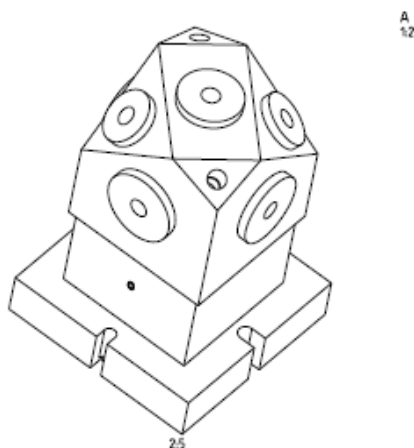
obr. 16 Zkušební obrobek pro technologii frézování dle ISO 10791-7:2020

Dále existuje celá řada zkušebních obrobků zaměřených na kontinuální pětiosé obrábění, 3+2 obrábění nebo jako univerzální zohledňující výše uvedené způsoby obrábění. Jako příklad lze uvést zkušební obrobek definovaný směrnicí VDI NCG 5211-1. Tento obrobek má potom tvar zobrazený na následujícím obrázku obr. 17.



obr. 17 Zkušební obrobek pro technologii frézování dle VDI NCG 5211-1

V neposlední řadě se jedná o vlastní návrhy zkušebních obrobků, které vznikly za účelem kontrolovat vybrané rozměrové a tvarové odchylky, které mají vysokou vypovídající hodnotu pro zpětné posouzení kvality výrobního stroje. Na obr. 18 je zobrazen zkušební obrobek pro ověření pracovní přesnosti pro obrábění 3+2 firmy DMG MORI.



obr. 18 Zkušební obrobek pro technologii frézování dle DMG MORI

## 1.7 VÝROBNÍ PŘESNOST

Výrobní přesnost popisuje přesnost výrobního procesu na obrobku. Výrobní přesnost je ovlivněná geometrickou přesností, přesností polohování, pracovní přesností, dále chybami vzniklými od obsluhy stroje (špatně seřízený nástroj, špatně upnutý obrobek) a změnou okolních podmínek. Přímou informaci o výrobní přesnosti udávají naměřené hodnoty rozměrů a geometrických odchylek obrobených dílců.

V publikaci [25] jsou prezentovány tři hlavní vlivy působící na obráběcí stroj a výrobní proces, které způsobují odchylky rozměrů obrobku:

- teplotní vlivy,
- statická tuhost soustavy stroj – nástroj – obrobek,
- dynamická poddajnost soustavy stroj – nástroj – obrobek.

K výše uvedeným třem hlavním vlivům lze podrobněji přiřadit vlivy [25]:

- technologie výroby 15 %,
- pracovní přesnost stroje 25 %,
- měření 15 %,
- okolní prostředí 20 %,
- obráběná součást 5 %,
- obsluha stroje 20 %.

Výrobní přesnost ohodnocené indexy způsobilosti ( $c_p$ ,  $c_{pk}$ ) je zpravidla sledována pomocí nasazení vhodných postupů a metod např. SPC (statistické řízení procesu). Tento přístup je u některých výrobních procesů již překonán. Jedná se o výrobní procesy se 100% kontrolou výrobků.

Vzhledem ke spektru obrobků středně velkých a velkých CNC obráběcích strojů lze metodu SPC stále brát jako vhodnou.

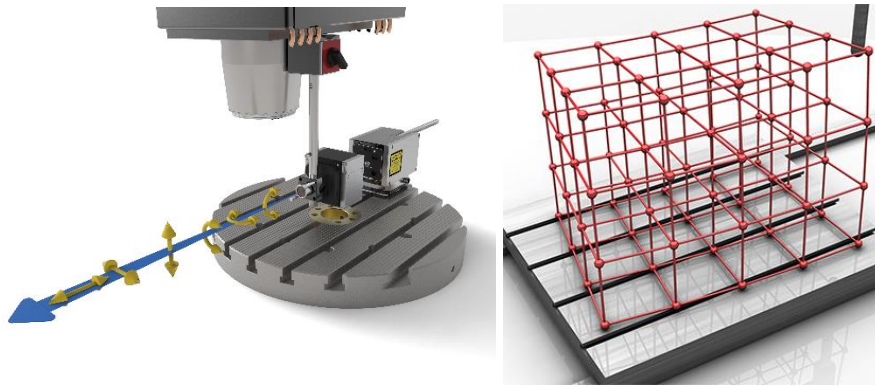
## 1.8 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

### 1.8.1 Průmyslové aplikace – měření volumetrické přesnosti

Mezi průmyslové lídry v oblasti vývoje přístrojů pro měření volumetrické přesnosti obráběcích strojů patří firmy RENISHAW, ETALON, IBS Precision Engineering, Automated Precision API:

- **RENISHAW, Anglie**

V roce 2018 uvedla firma RENISHAW vícekanálový laserový interferometr na trh navržený pro posouzení volumetrické přesnosti včetně softwaru pro zavádění volumetrických kompenzací (obr. 19).



obr. 19 Vícekanálový laserový interferometr XM-60 [RENISHAW]

– **ETALON AG, Německo**

V roce 2006 byl uveden na trh samonaváděcí laserový interferometr LaserTRACER. Na obr. 20 vlevo je znázorněn samonaváděcí laserový interferometr nové generace – LaserTRACER-NG od firmy ETALON AG. Na obr. 20 vpravo je znázorněn měřicí systém Absolute Multiline vyvinutý na znalostech LaserTRACERU od stejné firmy. Vývoj zařízení LaserTRACER byl průběžně publikován ve vědeckých časopisech a prezentován zejména na konferencích CIRP. Publikace [26] poskytuje technický přehled dostupných optických metod pro rozměrovou metrologii. Jsou popsány metody pro měření délky, úhlu, tvaru povrchu a prostorových souřadnic. Příspěvek shrnuje jak metrologické charakteristiky, tak technická omezení metod. Dále představuje některé nové a slibné přístupy, které v budoucnu mohou hrát důležitou roli v rozměrové metrologii výroby. V [27] jsou popsány vysoce přesné techniky používající CMM pro měření válcových obrobků. Navržená metoda je kombinací technik vícenásobné orientace a substituce a kompenzuje všechny geometrické chyby CMM, systematické snímací účinky a ohýbání obrobku v důsledku gravitace. Článek [28] analyzuje roli metrologie ve výrobě, ilustruje různé způsoby, jak vyhodnotit přínos metrologie a dává metrologům vodítko prodávat metrologii s ekonomickými argumenty. Příklady z různých oborů strojírenství ilustrují produktivní role metrologie. Článek [29] shrnuje základy numerické kompenzace chyb a dostupné metody pro měření geometrických chyb stroje. Diskutuje nejistoty spojené s různými metodami mapování a jejich aplikační charakteristiky. Dále jsou specifikovány výzvy pro použití numerické kompenzace pro výrobní stroje. Publikace [30] popisuje uvedení na trh tzv. sledovacích interferometrů pro kalibraci geometrie tříosých strojů. Nedávný výzkum rozšířil tuto technologii na nepřetržitý sběr

dat v průběhu měření (on-the-fly) a kalibraci rotačních os. Výše uvedená publikace mimo jiné popisuje technické uspořádání a matematické základy výpočtu geometrických chyb a dále představuje dosažené experimentální výsledky. Článek [31] se zabývá přesností kompenzace obráběcích strojů pomocí samonaváděcího interferometru metodou multilaterace (sekvenční multilaterace). Je studována strategie měření a možnosti kompenzace tepelného driftu měření.



obr. 20 LaserTRACER-NG, Absolute multiline technology [ETALON-AG]

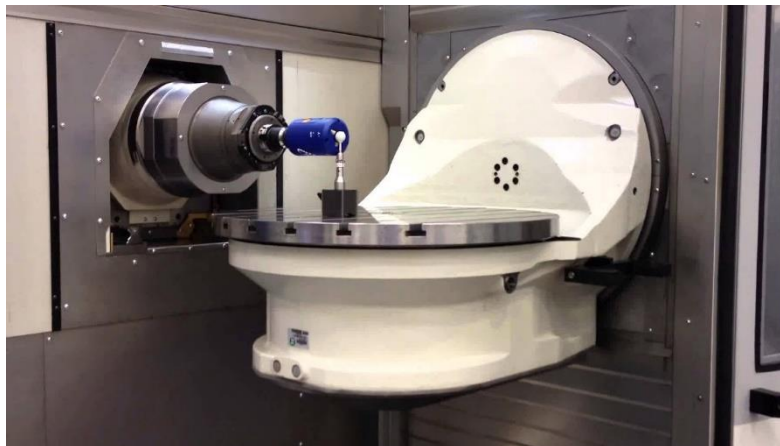
#### – *IBS Precision Engineering, Nizozemí*

Firma IBS Precision Engineering (IBSPE) se věnuje vývoji zařízení pro přesné strojírenství přes 20 let. Jednou z dominantní oblastí je posuzování geometrické přesnosti obráběcích strojů a zejména oblast vřeten a rotačních os.

Pro posouzení volumetrické odchylky pětiosých obráběcích center lze z produkce IBSPE zařadit měřicí zařízení Rotary analyzer, obr. 21. Zařízení slouží zejména pro kompenzace kinematických chyb rotačních os, ale díky možnosti kontinuálního měření lze s ním vyhodnotit i výslednou volumetrickou odchylku při současném pohybu všech pěti os. V článku [32] jsou popsány dynamické měření, tzv. R-test. Z analýzy lze získat informace o „dynamické chybě“ rotační osy, u níž se výsledek měření ve směru hodinových ručiček výrazně liší od měření proti směru hodinových ručiček. Ověření pomocí kulového artefaktu ukazuje, že to není způsobeno lineárními osami stroje. Dynamická vůle je způsobena synchronizační chybou závislou na rotaci mezi rotační osou a dvěma lineárními osami. Článek [33] se zabývá vztahem mezi geometrickými odchylkami obrobku a měřeným parametrem dle ISO 10791-6:2014 – chyby rotačních os. Tímto způsobem lze pro účely certifikace, nezbytné např. pro letecký průmysl, výrazně snížit potřebu frézování (mnoha) zkušebních kusů. V článku [34] je představena



a navržena metoda pro měření pětiosých obráběcích center, kde navržená hodnota  $Q$  vyjadřuje amplitudy strojních odchylek jako jediného parametru polohy, který ukazuje přesnost stroje při kontinuálním pětiosém pohybu.



obr. 21 Rotary analyzer [IBSPE]

– *Automated Precision (API), USA*

První laser tracker (1<sup>st</sup> generation Laser Tracker) byl uveden na trh v roce 1987. V roce 2010 byla na trh uvedena již třetí generace Laser Trackeru s prvkem „active target“. Tato sestava je určena pro měření a kompenzaci volumetrické přesnosti středně velkých a velkých CNC obráběcích strojů. Na obr. 22 je znázorněna sestava Laser Tracker Radian s Activ target pro hodnocení volumetrické odchylky obráběcích strojů.



obr. 22 Laser tracker Radian s Activ target systémem [API]

## 1.8.2 Řešená témata na vědecko-výzkumných pracovištích

Mezi vědecko-výzkumné pracoviště zabývající se dlouhodobě tematikou volumetrické přesnosti lze zahrnout potom:

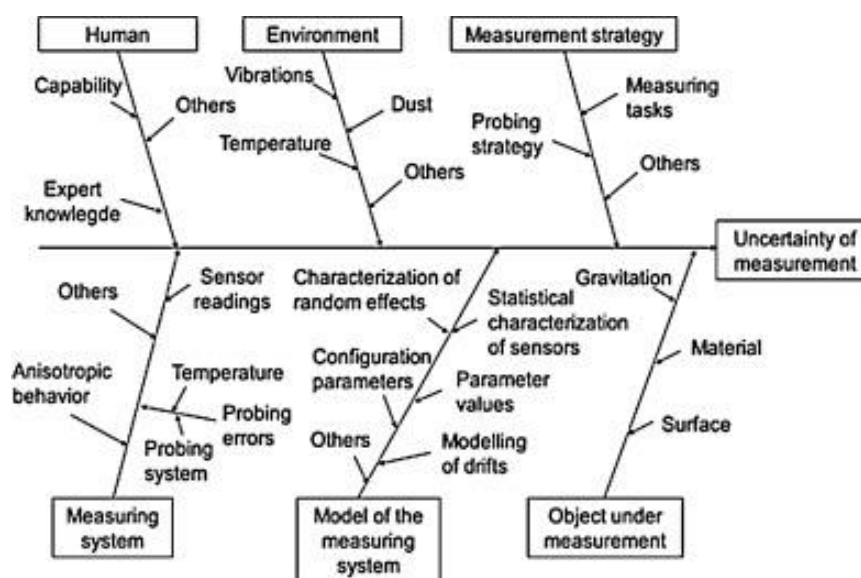
- *RWTH Aachen University, Německo*

Pracoviště řeší dlouhodobě problematiku analýzy chyb v pracovním prostoru výrobních strojů. Mezi řešené projekty lze zahrnout „Dynamická kalibrace pomocí Laser trackeru“. Cílem projektu bylo měření a korekce dynamických odchylek dráhy robotů a obráběcích strojů pomocí Laser trackeru. Cílem bylo snížit chybu najetí do požadované polohy pomocí kalibrace a kompenzace u robotů a obráběcích strojů.

Projekt „Zpětné měření geometrické přesnosti obráběcích strojů“ byl zaměřen na:

- měření geometrické přesnosti obráběcích strojů,
- integrace 3D měřicí techniky pro velké obrobky,
- precizní výrobu velkých obrobků.

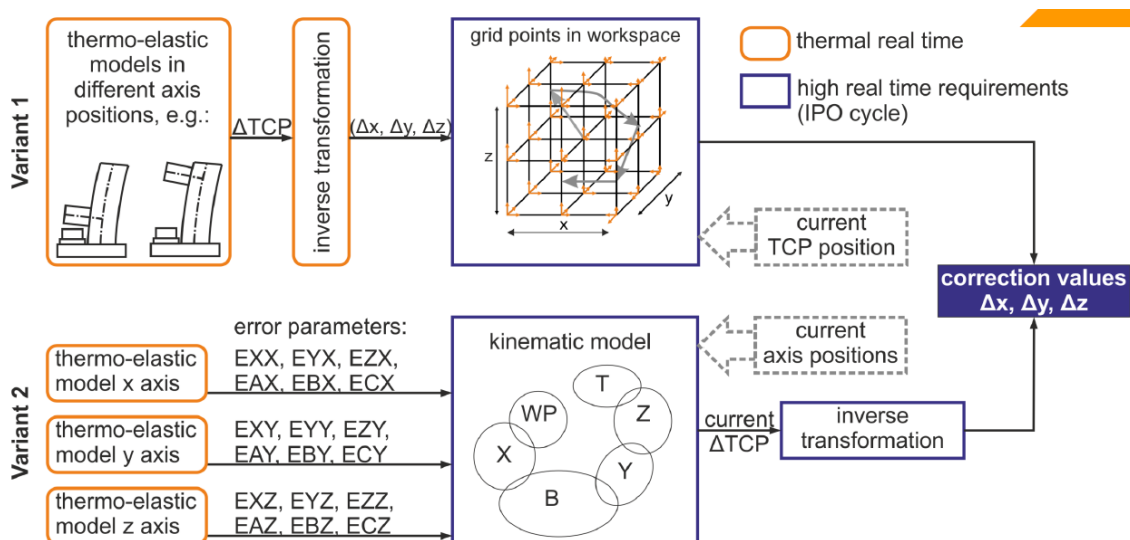
Publikace [35] je zaměřena na oblast „Large-Scale Metrology“, [36] na metrologickou návaznost na obráběcích strojích a témata spojená s volumetrickou přesností a kompenzacemi [37], [30]. Na obr. 23 jsou zobrazeny vlivy působící na proces měření ve formě Ishikaowa diagramu. V publikaci byly prezentovány výsledky rozsáhlé studie z oblastí geodézie a laboratorních měření orientovaných na „Large-scale Metrology“. Vybrané výsledky výše uvedeného pracoviště byly přejaty pro výzkumné aktivity na ÚVSSR.



obr. 23 Vlivy na měřicí procesy [35]

– **TU Dresden, Německo**

Pracoviště se zabývá problematikou termo-elastického chování obráběcích strojů a kompenzací těchto chyb. Hlavní část výzkumu pracoviště je zaměřena na teplotní chování a simulace, mechatronické a adaptivní systémy. Pro oblast kompenzací geometrických chyb je zajímavá oblast návrhu kompenzačních cyklů a přístup jejich zavádění do výrobních strojů. Zajímavým výzkumným úkolem je řešení projektu SFB/TR T05 – Efektivní technologie pro simulace analýz termo-elastického chování sestav obráběcích strojů. Publikace jsou zaměřeny na korekce založené na modelu struktury pro tepelné chyby na obráběcích strojích [38], [39]. Na konferenci CIRP 2016 General Assembly v Luganu byla prezentována práce na téma Self-optimizing thermal correction [40]. Kromě přístupů pro kompenzace volumetrických odchylek (obr. 24) byly výzkumným týmem prezentovány i požadavky na přístupy pro Self-optimizing, mezi které patří digitální modely relevantních částí stroje.



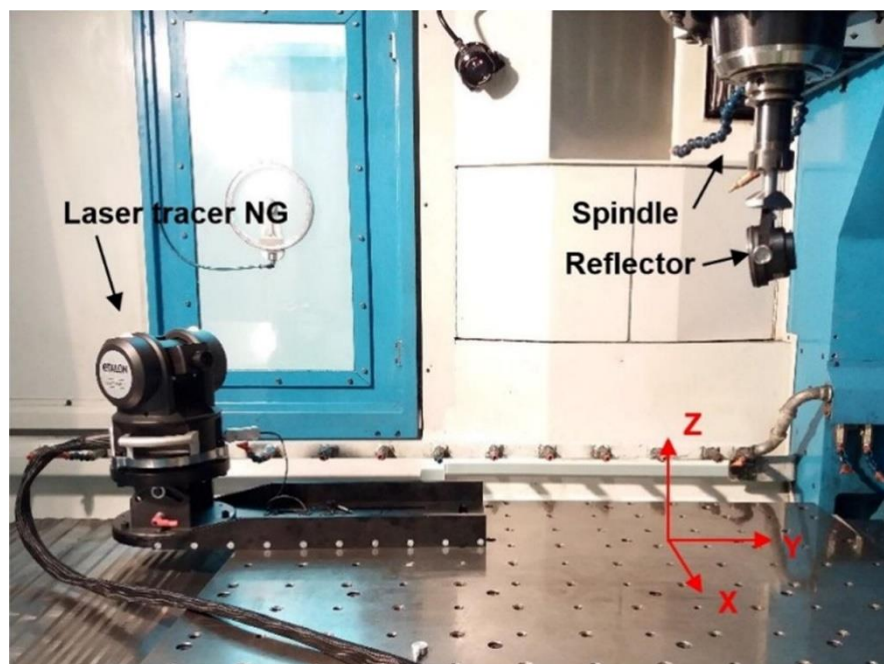
obr. 24 Korekční hodnoty závislé na poloze [40]

– **IK4-TEKNIKER, Španělsko**

Pracoviště se zabývá dlouhodobě aplikací volumetrických kompenzací a in-procesnímu měření. Jedná se zejména o aplikace volumetrických kompenzací pomocí samonaváděcího trackovacího zařízení LaserTRACER znázorněného na obr. 25. Jeden z výzkumných záměrů orientovaných na nejistoty měření, digitální dvojčata a řízení je projekt Twin control (<https://twincontrol.eu/>). Publikace jsou potom ve vztahu k předkládané práci orientovány do oblastí in-procesního měření a nejistot měření. Publikace [41] představuje proces provádění kalibrace výkonu kloubových měřících

strojů kloubových ramen podle standardu ASME B89.4.22. Rostoucí používání této třídy měřících zařízení bylo doprovázeno absencí autorizovaných laboratoří, které by poskytovaly kalibrační certifikáty pro měřicí ramena. Byly vyvinuty interní zkušební postupy a analýza hodnocení nejistoty a byly získány referenční zkušební zařízení certifikovaná ENAC (Entidad Nacional de Acreditacion). Práce [42] představuje integrovaný postup vícestranného ověřování, kdy byl sledovací interferometr přímo připojen k vřetenu výrobního systému jako nástroj, který řeší některá ze zmíněných omezení. Výsledky simulací i experimentálních testů ukazují, že lze zaručit úroveň nejistoty v rozmezí mikrometrů. Další z prací [43] je orientována na měřicí systém integrovaný v obráběcích strojích, což znamená, že obráběcí a měřicí procesy by mohly probíhat na stejném obráběcím stroji. Cílem této práce bylo posoudit hodnocení nejistoty měření na stroji střední velikosti a poskytnout přehled o významu každé složky nejistoty v podmínkách dílny. Za tímto účelem byl proveden experimentální test podle normy ISO 15530-3:2011 pro prizmatickou součást střední velikosti. Dotykové sondy se běžně používají v nových obráběcích strojích (OS) a umožňují obráběcí a měřicí procesy na stejném stroji OS.

Ve výše uvedených publikacích se autoři věnují oblastem zejména in-procesního měření a stanovení nejistot měření pro různé přístupy měření na CNC obráběcích strojů.



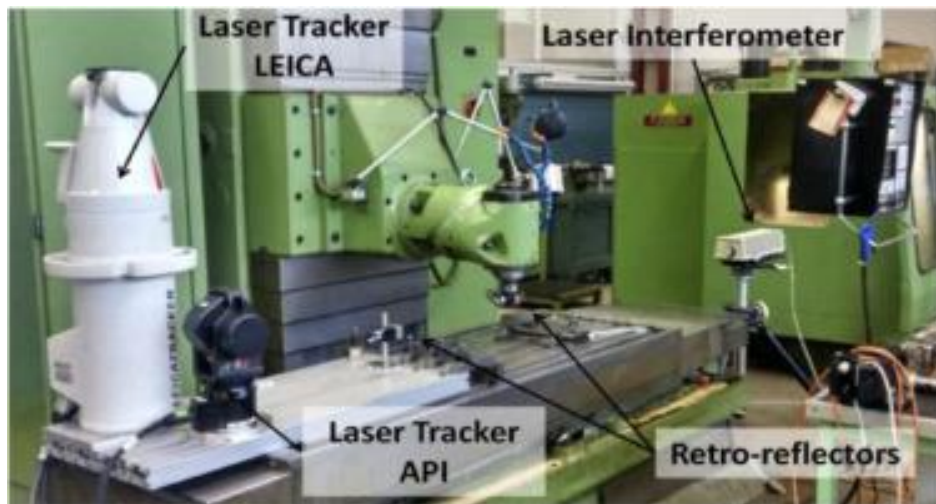
obr. 25 Laser tracer NG na obráběcím stroji KONDIA MAXIM [42]

– *Universidad de Zaragoza, Španělsko*

Pracoviště se dlouhodobě zabývá problematikou hodnocení volumetrických odchylek za využití laser trackerů a tématikou stanovení nejistoty měření Laser Trackerů. Publikace [44] představuje novou metodu pro volumetrického ověření obráběcích strojů pomocí Laser trackerů. Kromě posouzení konkrétního stroje je uvedena i obecná metodika ověřování volumetrické přesnosti založená na typu stroje dle počtu a pohybu os. Předložená práce [45] si kladla za cíl představit různé metody volumetrického ověřování pomocí komerčního laserového trackeru jako měřicího systému. Tato metoda umožňuje charakterizovat geometrické chyby obráběcího stroje v závislosti na kinematice stroje a pracovním prostoru, který je k dispozici během doby měření. Nejlepší kombinace parametrů, technik a metod byla získána realizací velkého počtu simulovaných testů založených na technikách nelineární optimalizace. Předložená práce [46] představuje vliv prostorového rozložení laserových trackerů (LT) na měření redukce šumu multilaterací, což vede ke zlepšení redukce prostorových chyb obráběcích strojů. Studie prostorového úhlu mezi LT, vzdálenosti a viditelnosti měřeného bodu se uvádí pomocí simulovaného testu. Publikace [47] představuje všechny procesy ověřování volumetrické přesnosti na reálném frézovacím stroji, studuje hlavní kroky a ovlivňující faktory, jako je kinematický model obráběcího stroje, vliv distribuce ověřovacích bodů, konvergenční kritéria, definovaná strategie identifikace a postup kompenzace. Přiměřenost matematické kompenzace poskytované touto metodou se ověřuje pomocí tradičních ověřovacích metod založených na laserovém interferometru a nových metod založených na laseru trackeru.

V publikacích jsou prezentovány různé přístupy měření, a to zejména velkých CNC obráběcích strojů pomocí Laser trackerů, včetně verifikačních postupů. Dále jsou prezentovány výsledky zaměřené na odhady nejistot měření výše uvedených měřicích zařízení realizovaných za laboratorních podmínek.



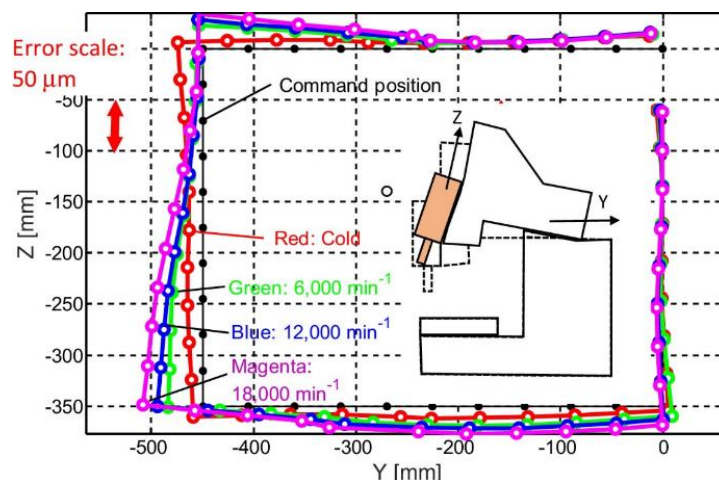


obr. 26 Verifikace volumetrické přesnosti na stroji Anayak VH 1800 XFYZ MT [47]

– *Kyoto University, Japonsko*

Pracoviště se dlouhodobě zabývá problematikou modelování volumetrických odchylek různých kinematických struktur obráběcích strojů.

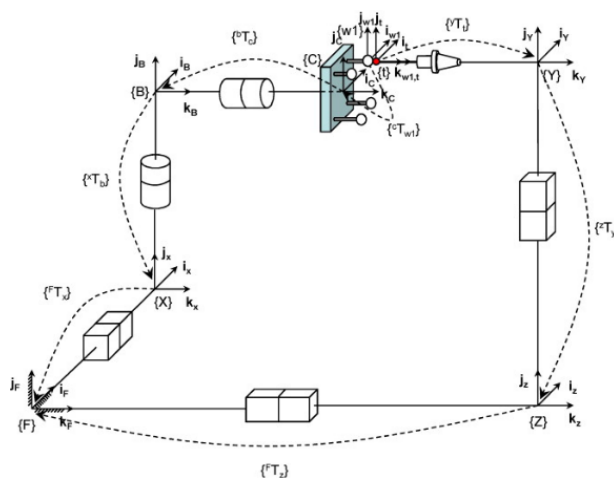
Článek [48] navrhuje efektivní a automatizované schéma pro kalibraci chybových parametrů rotačních os na pětiosém obráběcím centru pomocí metody měření R-testu. Byl prezentován algoritmus pro identifikaci nejen kinematických chyb, ale také geometrických chyb závislých na poloze nebo „chybové mapy“ rotačních os. V článku [49] je navržen trackovací interferometr s otevřenou smyčkou, kde je laserový paprsek regulován směrem k cílové poloze. To eliminuje automatizovaný sledovací mechanismus, a tak může výrazně snížit výrobní náklady na konvenční trackovací interferometry. Cílem této práce bylo ověřit tento koncept interferometru s otevřenou smyčkou tím, že zkoumá jeho nejistotu měření experimentálně i analyticky. Článek [50] navrhuje použití trackovacího interferometru pro vyhodnocení teplotního vlivu na dvourozměrnou trajektorii pohybu. Na obr. 27 jsou prezentovány výsledky měření za použití interferometru pro sledování a vyhodnocení tepelného vlivu na dvourozměrnou trajektorii pohybu. Úplný multilaterační algoritmus vyžaduje nejméně čtyři testy opakované v různých polohách sledovacího interferometru, pokud je k dispozici pouze jeden sledovací interferometr. Navrženou metodu lze použít v rámci teplotních zkoušek a obsahuje také analýzu nejistot měření. Publikace [51] navrhuje postup měření a seřízení pro chyby virtuálního pivotu pomocí R-testu a zkoumá vliv chyb virtuálních bodů rotace na povrchový profil při leštění povrchu. Postup úpravy pro chyby virtuálního pivotu je vyvinut pomocí matematické analýzy.



obr. 27 Odhadované trajektorie v rovině YZ na konci každého chodu vřetena po dobu 1 h. Chyba z trajektorie příkazu je 1000krát zvětšena. Schematický strojový diagram ilustruje interpretaci strukturální deformace způsobující takovou změnu odhadovaných trajektorií [50]

#### – Polytechnique Montreal ,Kanada

Pracoviště se dlouhodobě zabývá problematikou volumetrickou přesností pětiosých obráběcích center. Práce je zaměřena zejména na problematiku modelování volumetrických odchylek od rotačních os a návrhy měřicích přípravků využívajících obrobkové sondy. Publikace [52] popisuje návrh metod pro diagnostiku CMM založených na vícenásobném redundantním testování. Využití kalibrovaného a nekalibrovaného rekonfigurovatelného artefaktu pro diagnostiku pětiosých strojů jsou prezentovány v publikacích [53], [54], dále byla navržena verifikační metoda pro ověření volumetrických kompenzací na zkušebním obrobku [55].



obr. 28 Nominální model pětiosého stroje s topologií WCBXFZYT [53]

## 1.9 DÍLČÍ ZÁVĚR

V předešlém textu jsme zdůraznili typy přesností, které jsou signifikantní pro konstrukci a posléze výrobu CNC obráběcího stroje. Dominující roli hraje geometrická přesnost, která ovlivňuje všechny ostatní přesnosti. Geometrickou přesnost má z velké části v rukou konstruktér, který rozhoduje o tom, jaké úchytky tvaru a polohy předepisuje na výrobních výkresech jednotlivých funkčních dílců. Jistou roli hraje též vlastní výroba a montáž jednotlivých skupin stroje a následně celku. Ve výsledku to bude také ovlivněno dodržáním technologické kázně při výrobě a montáži stroje, nicméně prvotní bude vždy volba konstruktéra.

Je zřejmé, že na významnost jednotlivých přesností můžeme pohlížet z pohledu výrobce, anebo uživatele CNC obráběcího stroje. Pro výrobce je důležitá geometrická a pracovní přesnost včetně přesnosti a opakovatelnosti najetí do polohy. Uživatel naopak bude preferovat výrobní přesnost, která mu potvrzuje skutečnost, zda je schopen obrobit své obrobky na zakoupeném stroji.

Důležitost jednotlivých přesností bez ohledu na to, zda se jedná o výrobce, nebo uživatele podtrhuje rešerše současného stavu poznání jednak v průmyslových aplikacích, tak i na jednotlivých výzkumných pracovištích po celém světě. Z tohoto poznání vyplynulo, že existuje ještě další přesnost, které je doposud ve světě stavby CNC obráběcích strojů v počátcích. Jedná se o volumetrickou přesnost, která v sobě synergickým efektem snoubí všechny popsané přesnosti. Tento synergický efekt je nyní velmi intenzivně jak u výrobců a zejména pak uživatelů zkoumán a velmi obezřetně aplikován.



## **2 PŘÍNOS AUTORA KE STAVU POZNÁNÍ V OBLASTI HODNOCENÍ VOLUMETRICKÉ PŘESNOSTI CNC OBRÁBĚCÍCH STROJŮ**

Aplikace volumetrických kompenzací do průmyslové výroby sebou přináší celou řadu otázek zejména od výrobců obráběcích strojů. Když pomíneme otázku finančních nákladů spojených s pořízením potřebného HW a SW do obráběcího stroje, tak následující otázka zní: „Jaký přínos bude mít volumetrická kompenzace na výsledný obrobek“?

Aby bylo možné tuto otázku zodpovědět, je nezbytné analyzovat a prokázat závislost mezi volumetrickou přesností obráběcího stroje a pracovní přesností CNC obráběcího stroje. Dále je snahou tyto závislosti vhodně popsat a definovat jejich omezující podmínky. Díky takovýmto znalostem o geometrickém chování stroje bude možné dále predikovat rozměrovou a geometrickou přesnost obrobků a cíleně zvyšovat pracovní přesnost obráběcího stroje pomocí vhodných opatření. Tato kapitola je zaměřena na popis současného stavu poznání vědy a techniky v oblasti volumetrické přesnosti včetně částí zahrnující vlastní autorovy přínosy.

### **2.1 ÚVOD DO OBLASTI VOLUMETRICKÉ PŘESNOSTI**

Predikovat rozměrovou a tvarovou přesnost obrobku s přijatelnou nejistotou je cílem celé řady uživatelů obráběcích strojů, výrobců a výzkumných týmů. Díky know-how je možné vhodně volit technologie a stroje bez nezbytných dlouhodobých pracovních zkoušek, které dále zvyšují náklady budoucí výroby. Jednou z možností, jak tyto náklady efektivně snižovat, je využití znalostí o geometrické přesnosti stroje (strojů) a díky dostatečnému množství informací predikovat výslednou rozměrovou a tvarovou přesnost obrobku.

Existuje celá škála normalizovaných i nenormalizovaných zkušebních obrobků, na jejichž základě lze posoudit vhodnost stroje pro obráběné spektrum obrobků. Nevýhodou tohoto řešení je jeho nákladnost v podobě spotřebovaného materiálu, nástrojů a času spojeného s přípravou.

V rámci dlouhodobého řešení VaV úkolů na ÚVSSR je cílem využít dat ze zkoušek geometrické a kinematické přesnosti strojů a ty dále vhodně posoudit s výslednou pracovní přesností hodnocenou na obrobku.

Současný stav poznání v této oblasti spočívá v identifikaci volumetrických odchylek obráběcích center a jejich následné kompenzaci. Postupy pro získání vstupních dat pro následnou kompenzaci vychází z know-how výrobce měřicího zařízení bez možnosti tyto vstupní data přizpůsobit konkrétnímu obrobku.

Existuje poměrně široké spektrum měřicích zařízení pro identifikaci volumetrických odchylek založených na různých postupech měření. Jednotlivé typy měřicích zařízení a jejich bližší popis včetně vybraných technických parametrů jsou součástí kapitoly 2.2.

### **2.1.1 Závislost mezi volumetrickou a pracovní přesností**

Analyzovat a prokázat závislost mezi volumetrickou přesností obráběcího stroje a finálním obrobkem je založeno na znalostech získaných při posuzování geometrické a volumetrické přesnosti stroje. Jelikož je nezbytné přistupovat individuálně při zavádění volumetrických kompenzací ke každému typu kinematického řetězce stroje, bude tento postup dodržen i z pohledu budoucí analýzy hledané závislosti. V následujících bodech jsou definovány jednotlivé dílčí cíle, které budou využity pro analýzu závislosti mezi volumetrickou přesností a pracovní přesností.

- Popis pracovního prostoru stroje

Dílčím úkolem je navrhnout vhodné postupy pro jednotlivé typy kinematik CNC obráběcích strojů a popsat volumetrické odchylky ve vybraných bodech pracovního prostoru. Z toho vyplývá, že návrh strategie měření a body pracovního prostoru musí vycházet především z typu a velikosti obráběcího stroje. V opačném případě dojde k nesprávné interpretaci výsledných dat a zpravidla dojde ke zhoršení geometrické přesnosti stroje, případně ke zkreslení výsledků.

- Popis jednotlivých strojních uzlů

Na základě komplexního popisu pracovního prostoru stroje je možné identifikovat geometrické a kinematické chyby jednotlivých uzlů stroje nebo jejich kinematických dvojic. Potom je možné tyto znalosti využít jako zpětnou vazbu pro návrh nových

výpočetních modelů geometrických a kinematických chyb obráběcích strojů. Dílčím úkolem je přiřadit chyby jednotlivým uzlům stroje.

- Identifikace dílčích chyb

Dalším účinným nástrojem pro efektivní eliminaci geometrických chyb stroje je jejich snižování způsobem postupného zavádění korekcí nebo úpravou konstrukce stroje. Zde je nezbytná znalost jednotlivých chyb stroje, jejichž počet se liší podle typu stroje, a zvoleného výpočtového modelu volumetrických odchylek. Dílčím úkolem je ověřit, zda lze vhodnou kombinací postupu aktivací korekcí do stroje efektivněji zvyšovat volumetrickou přesnost stroje. Možnost posouzení změny konstrukce stroje není v této habilitační práci řešena.

### **2.1.2 Požadavky kladené na volumetrické kompenzace**

Posuzování geometrické přesnosti obráběcích strojů patří mezi standardní úkony výroby obráběcích strojů. Každý výrobce CNC obráběcích strojů provádí během montáže a po zprovoznění zkoušky minimálně dle ISO 230-1, 2, 4. Zde jsou uvedené postupy měření a doporučené měřicí zařízení. Dále někteří výrobci strojů doplňují tyto zkoušky řady ISO 230 o své interní zkoušky, popisující některé nestandardní činnosti na strojích. Může se jednat o výkonové zkoušky, kdy se testuje mez stability stroje, zkoušky zahrnující postupy nestandardního typu obrábění (např. osazení stroje novým typem frézovací hlavy s novou kinematickou) nebo zkoušky přizpůsobené požadavkům zákazníka.

Při posuzování volumetrické přesnosti nebo pro aktivaci volumetrických kompenzací je nutné věnovat pozornost požadavkům nejen na HW a SW měřicího zařízení, typu OS a typu řídicího systému stroje a jeho nastavení, a dále výrobnímu prostředí a procesu obrábění. V následujících bodech jsou specifikovány body, které musí být zohledněny pro posuzování volumetrické přesnosti a aktivaci volumetrické kompenzace.

- Vhodně vybrat měřicí zařízení

V rámci přípravy posuzování geometrické přesnosti stroje je nezbytné provést vhodný výběr měřicího zařízení, jak z pohledu jejich přesnosti, tak z pohledu časové náročnosti měření, citlivosti vůči okolnímu prostředí a také ekonomického hlediska.

- Zajistit stabilní prostředí

Stabilita okolního prostředí úzce souvisí se stabilitou stroje a má tedy významný vliv na výslednou kvalitu naměřených dat. Jedná se zejména o teplotu, vibrace a rázy. Tyto vlivy zkreslují výsledky měření a dochází tak velmi často ke špatné interpretaci naměřených dat, ze kterých mohou být následně generovány kompenzační data.

- Způsobilý stroj

CNC obráběcí stroj musí mít zpravidla uzpůsobenou kinematiku dle ISO 841:2001. V opačném případě je velmi obtížné interpretovat výsledky měření a musí se provádět kontrolní měření dalšími měřicími přístroji, což vede ke zvyšování požadavků na čas a náklady. Jelikož nejsou softwary uživatelům přístupné pro případnou editaci dat, tak kompenzační tabulky získané u strojů, které nemají kinematiku dle ISO 841:2001 není možné standardně použít. Velmi důležitým předpokladem pro aplikaci volumetrických kompenzací je také dlouhodobá teplotní stabilita stroje. V opačném případě dochází vlivem teplotní nestability stroje ke změně geometrické přesnosti stroje a ke zkreslení získaných výsledků.

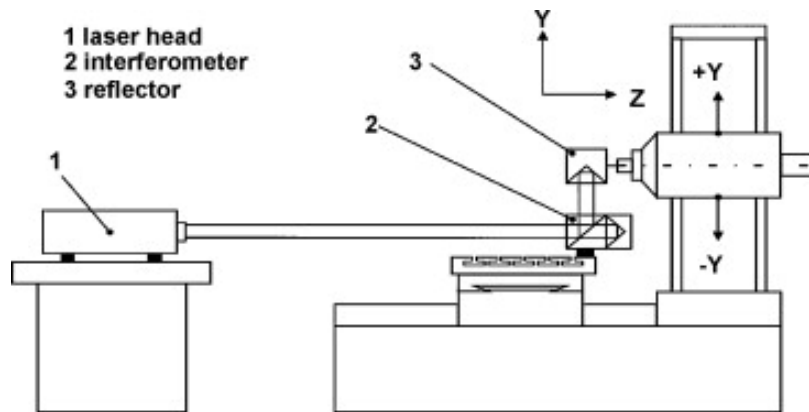
## 2.2 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ VOLUMETRICKÉ PŘESNOSTI

*Tato kapitola obsahuje postupy a výsledky projektu TA04011406 „Využití progresivních technologií pro efektivní stavbu obráběcích strojů“. Projekt byl řešený v letech 2014–2017 a byl finančně podpořen Technologickou agenturou České republiky. Prezentované výsledky vznikly ve spolupráci s autory (uvedeno abecedně) Ing. Michal Holub Ph.D., Ing. Josef Knobloch M.Sc., Ing. Tomáš Marek, Ing. Jan Vetiška, Ph.D. (s autorovým podílem), [2] (70 %), [56] (60 %), [57] (35 %).*

Stanovení volumetrické přesnosti obráběcího stroje je ovlivněna nejen postupem měření, ale také samotným měřicím zařízením, nebo jejich kombinací. Měřicí technika se neustále vyvíjí z pohledu hardwaru a softwaru. S novými technologiemi se otevírá prostor pro nové postupy měření, či aplikace vedoucí k efektivnějšímu posuzování samotného stroje.

Měřicí zařízení lze rozdělit dle postupu měření na přímé a nepřímé metody měření [57]:

- Metody přímé kalibrace identifikují měřené veličiny – geometrické parametry jedné osy přímo bez zapojení dalších os.



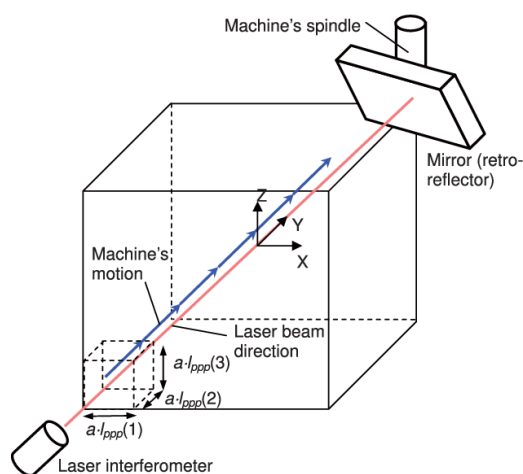
obr. 29 Metoda přímého měření – měření přesnosti a opakovatelnosti najetí do polohy řízené osy [29]

Přímé metody lze rozdělit do tří skupin podle typu použité metrologické reference. Metody založené na materiálu používají artefakty, tj. přímky, krokoměry nebo lineární kodéry. Pro odstranění nevýhod elementárních materiálových standardů, které představují pouze jedno určité použití, se používají vícerozměrné měřicí artefakty. Jako příklad lze uvést lineární artefakt s kalibrovanými souřadnicemi sfér nebo 2D kuličkové desky vyrobené z uhlíkových vláken.

Měření mohou dále používat vlnovou délku laserového světla jako další typ reference. Tato interferometrická metoda je velmi vhodná pro měření délek při zachování přesnosti i na velké vzdálenosti. Laserové interferometrické systémy jsou vybaveny optickým příslušenstvím, které umožňuje měření vzdálenosti, úhlu nebo přímosti. Existují měřicí systémy, které kombinují více optických senzorů pro provádění současného měření.

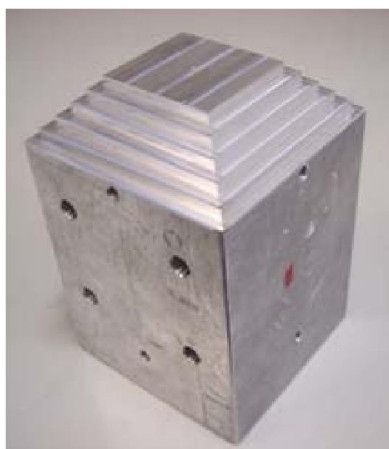
Další skupina přímých metod je založena na směru gravitačního vektoru. Měřením úhlu v délkách po stupních lze vyhodnotit přímost, kolmost nebo rovinnost.

- Nepřímé metody využívají měření TCP a vyžadují zpravidla umožnění víceosého pohybu na stroji (např. test diagonály).



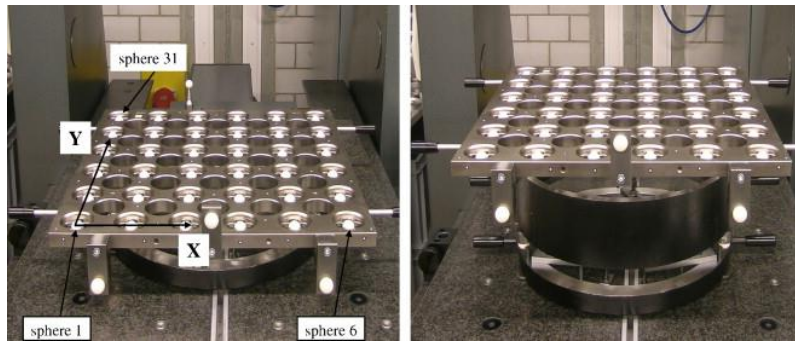
obr. 30 Test měření diagonály [58]

Tyto metody jsou obecně méně přesné, ale také mnohem méně náročné na čas [20]. Další skupinou je obrábění zkušebních obrobků (obr. 31) s následným proměřením na CMM.



obr. 31 Zkušební obrobek pro identifikaci chyb rotačních os [59]

Další skupinou zkoušek nepřímého měření je nasazení kalibrovaných artefaktů (obr. 32). Jiné způsoby měření používají současný pohyb dvou nebo více os a hodnotí vytvořenou trajektorii, např. kruhové dráhy nebo přímé úhlopříčky pracovního objemu stroje. Začleněním kinematického modelování a numerického výpočtu mohou být tyto metody při kalibraci obráběcích strojů velmi účinné. Na druhé straně existuje obecně větší počet faktorů, které mohou ovlivnit nepřímé měření spíše než přímé měření.



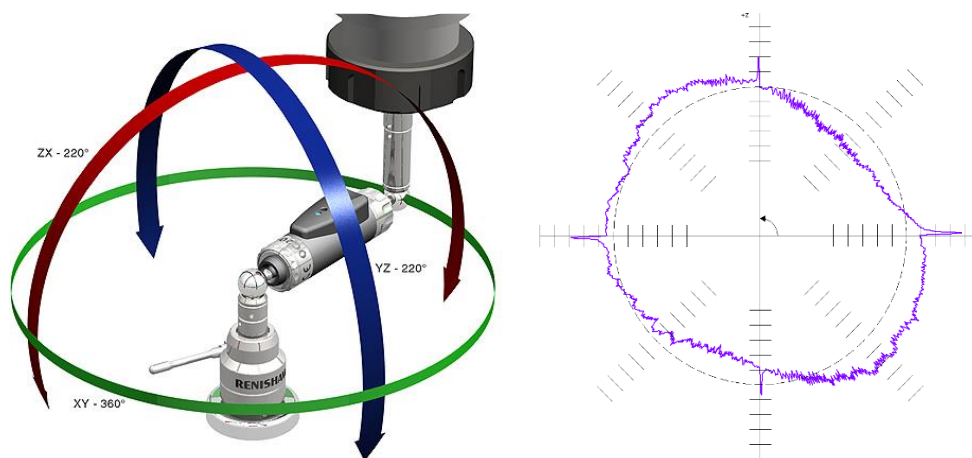
obr. 32 „Ball plate“ s definovaným souřadným systémem [60]

### 2.2.1 Ballbar

Diagnostické zařízení Ballbar (obr. 33) bylo v rámci řešení výzkumných aktivit využíváno především pro ověření zavedení geometrických a volumetrických kompenzací (CEC, ENC a VCS) do stroje. Z provedených zkoušek vyplynuly požadavky kladené na ověřování zavedených korekcí do stroje. Zkouška diagnostickým přístrojem Ballbar je založena na principu zkoušky kruhové interpolace a probíhá dle normy ISO 230-4:2005. Expertní software mimo parametry definované dle ISO 230-4:2005 vyhodnocuje další geometrické a dynamické chyby: kolmost os, příčné a axiální vůle, reverzační špičky, chyby servopohonů, odměřování, vibrace

- Technický popis Ballbar QC20-w

Jedná se o expertní diagnostický systém navržený pro rychlou kontrolu stavu obráběcích strojů. V principu je použitelný pro libovolnou kinematiku umožňující interpolaci ve dvou řízených lineárních osách.



obr. 33 Ukázka vyhodnocení Ballbar QC20-w [RENISHAW]

V následující tabulce jsou uvedeny základní technické parametry měřicího zařízení.

tab. 3 Technické parametry zařízení QC20-w [RENISHAW]

<i>Parametr</i>	<i>Hodnota</i>
Rozlišení snímače	0,1 $\mu\text{m}$
MPE	$\pm 1,25 \mu\text{m}$
$U_{(k=2)}$	0,7+0,3L $\mu\text{m}$
Provozní teplota	0 až 40 °C
Max. rychlost snímání	1000 Hz
Rozsah měření	$\pm 1 \text{ mm}$
Rozsahy průměrů měření	100–1000 mm

### 2.2.2 Laser interferometr

Laser interferometr XL-80 (RENISHAW) je nezbytným vybavením každého výrobce obráběcích strojů a bývá zpravidla využíván pro kontrolu a kompenzaci přesnosti najetí do polohy (ENC, CEC) a dále průhybových kompenzací (CEC).

Nový vícepaprskový laser interferometr XM60 (RENISHAW) je určen pro vyhodnocení všech šesti chyb lineární osy ( $E_{XX}$ ,  $E_{YX}$ ,  $E_{ZX}$ ,  $E_{AX}$ ,  $E_{BX}$ ,  $E_{CX}$ ) na jeden cyklus měření. Jeho použitím dochází k výrazným časovým úsporám oproti konvenčnímu jednopaprskovému laserovému interferometru.

- Jednopaprskový laser interferometr

Laserová hlavice XL-80 vytváří velmi stabilní svazek laserového záření s vlnovou délkou odpovídající národním a mezinárodním normám. Stabilita frekvence vyzařované vlnové délky je  $\pm 0,05 \text{ ppm}$  za 1 rok a  $\pm 0,02 \text{ ppm}$  za 1 hodinu. K laserové hlavici je nabízeno příslušenství pro měření přesnosti najetí do polohy, přímosti, úhlových chyb, kolmosti (obr. 34).





obr. 34 Ukázka souboru optického příslušenství pro měření laser interferometrem [RENISHAW]

Technické parametry laserové hlavy XL-80 jsou zobrazeny v následující tabulce. Pro konkrétní sestavu musí být zohledněny i další prvky sestavy.

tab. 4 Technické parametry měřicího zařízení XL-80 [RENISHAW]

<i>Parametr</i>	<i>Hodnota</i>
MPE	$\pm 0,5 \mu\text{m/m}$
Rozlišení	1 nm
Dynamické měření	max. 4 m/s
Rozsah měření	80 m
Hmotnost	1,65 kg

- Vícepaprskový laserový interferometr

Na obr. 35 je zobrazen nový typ laserového interferometru, který umožňuje vyhodnotit 6ti geometrických chyb lineární osy v rámci jednoho projetí osy. Omezení představuje délka lineární osy, která nesmí přesáhnout 4000 mm.



obr. 35 Vícepaprskový laserový interferometr XM-60 [RENISHAW]

Technické parametry laserové hlavy XM-60 jsou zobrazeny v následující tabulce.

tab. 5 Technické parametry měřicího zařízení XM-60 [RENISHAW]

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
MPE – lineární chyba	$\pm 0,5$ ppm
Rozlišení – lineární chyba	1 nm
MPE – přímočarost	$\pm 0.01A \pm 1 \mu\text{m}$
Rozlišení – přímočarost	0,25 $\mu\text{m}$
MPE – úhlové chyby (pitch/yaw)	$\pm 0.004A \pm (0.5 \mu\text{rad} + 0.11M \mu\text{rad})$
Rozlišení – přímočarost (pitch/yaw)	0,03 $\mu\text{rad}$
MPE – úhlové chyby (roll)	$\pm 0.01A \pm 6.3 \mu\text{rad}$
Rozlišení – přímočarost (roll)	0,12 $\mu\text{rad}$
Rozsah měření	4 m

### 2.2.3 Digitální inklinometr

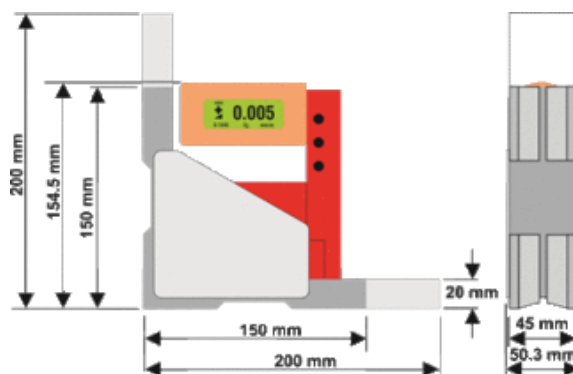
Systém digitálních inklinometrů (dále jen libel) BlueSYSTEM je ve stavbě strojů využíván k měření přímosti vodorovných a svislých vedení, případně rovinnosti ploch.

- Technický popis zařízení BlueSYSTEM

BlueSYSTEM SIGMA umožňuje bezdrátové spojení libel se softwarem Levelsoft Pro a MT-Soft (firma WYLER, AG). BlueSYSTEM SIGMA se skládá ze dvou elektronických libel BlueLEVEL (obr. 36) a ústředny BlueMETER SIGMA. Libely jsou napájeny z baterií, mají vlastní displej, a proto mohou být použity nezávisle. Jednotka BlueMETER SIGMA, která s libelami komunikuje bezdrátově je pak napojena přes USB kabel s počítačem.

Základna libel je v provedení s magnety nebo bez a je v délce 150 mm nebo 200 mm. Magnetické základny zvyšují nejistotu měření, protože přitahují kovový prach mezi dosedací plochy, ale jsou naopak vhodnější pro stacionární měření (monitorování výkyvu strojních částí), kde je jednodušší a stabilnější upnutí. Součástí systému je dálkové ovládání pro zapisování hodnot.

LevelSoft Pro je software dodávaný k sestavě BlueSystem pro měření základních geometrických úloh. Úlohy jsou předdefinované a jejich výhodou je přichystaná strategie měření v podobě grafického manuálu, automatické zapisování hodnot a okamžité zpracování výsledků včetně tvorby měřicího protokolu. MT Soft je software upravený pro potřeby kontroly geometrické přesnosti obráběcích strojů.



obr. 36 Digitální inklinometr BlueSYSTEM SIGMA [WYLER]

V tab. 6 jsou zobrazeny vybrané technické parametry elektronické libely BlueLEVEL.

tab. 6 Technické parametry BlueLEVEL. [WYLER AG]

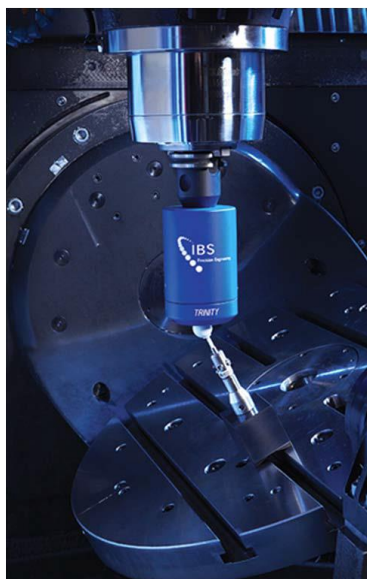
	<b><i>Elektronické libely BlueLEVEL (WYLER)</i></b>
Software	Levelsoft Pro a MT-Soft
Typ základny/ délka:	Prizmatická úhlová/ 200 mm
Rozlišení:	1 $\mu\text{m}/\text{m}$
	0,2 arcsec
MPE:	1 % z naměřené hodnoty / min. 0,001
Rozsah měření:	$\pm 20 \text{ mm}$
Přenos dat:	Bluetooth

#### 2.2.4 Rotary analyzer

Jedná se o měřicí zařízení sloužící pro měření rotačních os CNC obráběcích strojů. Na základě naměřených dat a jejich dalšího využití pro kompenzaci kinematických chyb rotačních os lze dále zvyšovat volumetrickou přesnost stroje.

- Technický popis zařízení Rotary analyzer

Zařízení vyhodnocuje chyby na základě naměřených dat ze tří po  $120^\circ$  ustavených kapacitních snímačů. Použití kapacitních snímačů ovlivňuje výslednou nejistotu měření, jak pro statický, tak pro dynamický režim měření. Dynamický režim přitom znamená získání nových informací o stavu rotačních os. Podstatnou nevýhodou jsou pořizovací náklady takového zařízení a tím i vysoká cena samotného měření. Hardware zařízení Rotary analyzer a ukázka jeho použití na otočném stole je znázorněna na obr. 37.



obr. 37 Nasazení měřicího zařízení – Rotary analyzer [61]

tab. 7 Technické parametry měřicího zařízení Rotary analyzer [61]

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Nejistota měření, k=2	$U_{1d} < 1 \mu\text{m}$ (do 1 mm rozsahu)
	$U_{1d} < 1,5 \mu\text{m}$ (v celém rozsahu)
Rozlišení	0,2 $\mu\text{m}$
Rozsah měření	3,5 mm
Vzorkování	2 kHz
Hmotnost	770 g

### 2.2.5 Laser tracker

„Laser tracker“ je obecný pojem pro zařízení schopná sledovat měřený objekt laserovým paprskem. Laser trackery popsané v této práci jsou mobilní souřadnicové měřicí přístroje, jejichž aplikace je současným trendem v oblasti měření geometrické přesnosti obráběcích strojů. Tato zařízení sledují reflektor a spolu se vzdáleností umožňují stanovit i úhlové natočení dvou rotačních os měřicí hlavy (obr. 38). Vzniklé sférické souřadnice jsou přepočítávány a výsledkem je údaj o poloze v kartézském systému (x, y, z).

- Technický popis měřicího zařízení AT901

Trackery oproti konvenčním přístrojům dávají informaci o poloze reflektoru ve třech kartézských souřadnicích. Výhodou trackerů je, že nevyžadují mechanické ustavení a z jednoho místa (pokud z něj jsou měřené části vidět) je možné proměřit celý stroj

a následně porovnávat prostorovou polohu libovolných geometrií. Měřit lze s poloměrem až 50 m.

Způsoby snímání bodů, jež výrobce trackeru nabízí, je několik. K dispozici jsou koutové a Cat-Eye reflektory a také sondy, které rozšiřují možnosti kontroly.



obr. 38 Leica AT901, CCR, T-Probe [LEICA]

V následující tabulce jsou znázorněny základní technické parametry měřicího zařízení.

tab. 8 Technické parametry měřicího zařízení Leica AT901 [LEICA]

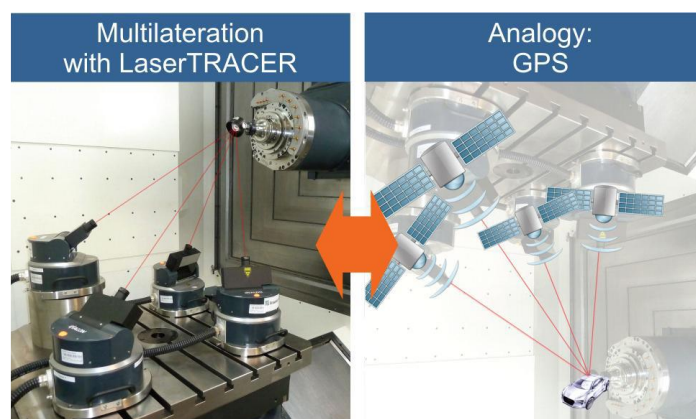
Frekvence měření	3000 bodů za sekundu
Frekvence měření výstupní	1000 bodů za sekundu
Rychlost sledování – tečná	4 m/s
Rychlost sledování – radiální	6 ms/s
Zrychlení tečné	2 g
<b>Absolutní laser AIFM</b>	
Čas do spuštění	8 min
Rozlišení interferometru	0,32 $\mu\text{m}$
Přesnost interferometru (MPE)	$\pm 0,5 \mu\text{m}$
Přesnost logování ADM (MPE)	$\pm 10 \mu\text{m}$
<b>Úhlové snímače</b>	
Úhlové rozlišení	0,14“
Úhlová opakovatelnost	$\pm 7,5 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m/m}$
Úhlová přesnost (MPE)	$\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$
Úhlová přesnost v 2,5x5x10 m (MPE)	$\pm 10 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m/m}$
<b>Rozsah měření</b>	
Rozsah	$\varnothing 50 \text{ m}$
Horizontální	360°
Vertikální	$\pm 45^\circ$

## 2.2.6 LaserTRACER

Měřicí zařízení LaserTRACER je využíváno převážně pro měření volumetrické přesnosti a následné volumetrické kompenzace u obráběcích strojů a souřadnicových měřicích strojů.

- Technický popis měřicího zařízení LaserTRACER

Princip měření pomocí přístroje LaserTRACER je založen na měření délek paprsku (vlnové délky HeNe laseru, 632,8 nm) a výpočtu měřeného bodu v prostoru metodou sekvenční multilaterace. U této metody je nezbytné provést měření postupně z více míst na stroji (doporučeno měřit z minimálně čtyř pozic LaserTRACERU). Metoda je prezentována jako analogie k systému GPS obr. 39.



obr. 39 Princip měření přístrojem LaserTRACER jeho analogie k GPS [ETALON]

Vybrané technické parametry měřicího zařízení jsou uvedeny v následující tabulce. Nejistota měření v prostoru zařízení je dostačující i pro nasazení do oblasti kalibrace souřadnicových měřicích strojů (CMM).

tab. 9 Technické parametry měřicího zařízení LaserTRACER [ETALON]

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Nejistota měření pro prostorové měření (k=2)	0,2 $\mu\text{m}$ + 0,3 $\mu\text{m}/\text{m}$
Rozlišení	0,001 $\mu\text{m}$
Měřicí rozsah	0,2 – 15 m
Úhlový rozsah natáčení (azimut)	-200° – 200°
Úhlový rozsah naklápění (elevace)	-20° – 85°
Rozsah reflektorů	120° do 15 m, 160° do 2,5 m
Maximální možné zrychlení	3 $\text{m}/\text{s}^2$
Maximální možná rychlost reflektoru	5 $\text{m}/\text{min}$
Hmotnost LaserTRACERu	cca 12 kg
Hmotnost řídicí jednotky	cca 10 kg

## 2.2.7 Absolute Multiline technologie

Jedná se o technologii umožňující měření délek s obdobnou nejistotou měření jako interferometrické měření (obr. 40). Při tomto řešení je možnost vyhodnocovat až 124 kanálů. Naskytuje se zde možnost nepřetržité kontroly geometrické přesnosti, ale také zavedení „automatizace“ v měření volumetrické přesnosti a implementace volumetrických kompenzací.



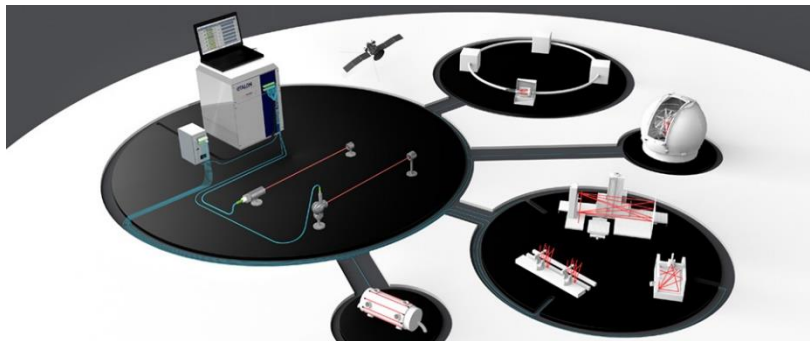
obr. 40 Ukázka nasazení Absolute Multiline na portálové konstrukci [ETALON]

tab. 10 Technické parametry Absolute Multiline [ETALON]

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Nejistota měření pro prostorové měření (k=2)	0,5L $\mu\text{m}$
Měřicí rozsah	0,2–30 m
Počet kanálů	4–124
Kompenzace okolí	Teplota, tlak, vlhkost

- Koncepce pro Industry 4.0

Na obr. 41 je představena koncepce Industry 4.0 dle firmy ETALON pro nasazení technologie Absolute Multiline. Tato koncepce zahrnuje oblasti monitoringu a diagnostiky zařízení z průmyslových oblastí energetika, strojírenství a vesmír.



obr. 41 Ukázka koncepce pro nasazení Absolute Multiline dle koncepce I 4.0 [ETALON]

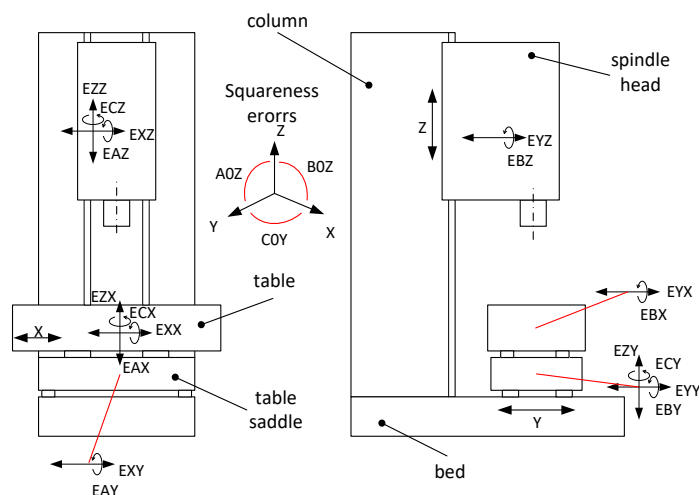


## 2.3 CNC OBRÁBĚCÍ STROJE

Pro úspěšnou a časově stabilní implementaci geometrických kompenzací je nezbytná znalost obráběcího stroje z hlediska jeho technického řešení, řídicího systému, v jakém pracovním prostředí a k jakým účelům je provozován. Na základě těchto informací lze navrhnout vhodné typy kompenzací a postupy jejich zavádění.

### 2.3.1 Tříosé frézovací vertikální obráběcí centrum

U tříosé kinematiky můžeme zpravidla hodnotit 21 parametrů chyb, 18 chyb translačních pohybů a 3 parametry kolmosti jednotlivých strojních os (obr. 42). Tyto chyby, včetně chyb vřetene jsou znázorněné pro tříosý frézovací vertikální stroj na obr. 43. Kinematický řetězec níže představeného tříosého obráběcího stroje odpovídá následujícímu tvaru WXYZT, kde W (Workpiece), X, Y, Z (strojní osy) a T (Tool).



obr. 42 Popis geometrických chyb stroje MCV 754 QUICK, KOVOSVIT-MAS [22]



obr. 43 Schéma stroje MCV 754 QUICK, KOVOSVIT-MAS [22]

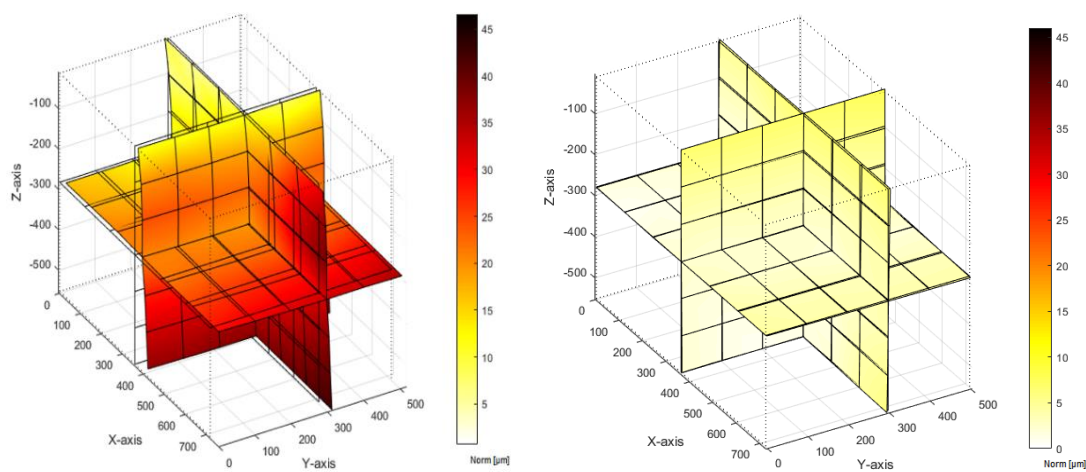


V rámci posuzování volumetrické přesnosti malého CNC obráběcího centra byly publikovány výsledky zahrnující různé přístupy nastavení strategie měření [62]. Ty se zpravidla zabývaly:

- kombinací měřicích poloh LaserTRACERU,
- posouzením odlišnosti výpočtových modelů (Full rigid body model, Reduced rigid body model) pro tříosé vertikální obráběcí centrum,
- vlivem počtu měřených bodů na výsledné volumetrické přesnosti stroje,
- vlivem způsobu trigrování na délce měření a výsledné volumetrické přesnosti,
- vlivem polohy teplotních snímačů na výsledné volumetrické přesnosti.

Ze získaných výsledků lze jednoznačně konstatovat, že návrh strategie měření a příprava stroje má významný vliv na výsledné velikosti a tvaru posuzované chyby. Tyto poznatky jsou dále rozvíjeny v rámci aktuálních VaV aktivit.

Na obr. 44 je grafické znázornění volumetrické přesnosti pracovního prostoru obráběcího stroje a jeho zobrazení volumetrické přesnosti. Na obrázku níže je znázorněna grafická interpretace volumetrické odchylky před a po volumetrické kompenzaci stroje.



obr. 44 Grafické znázornění volumetrické přesnosti [2]

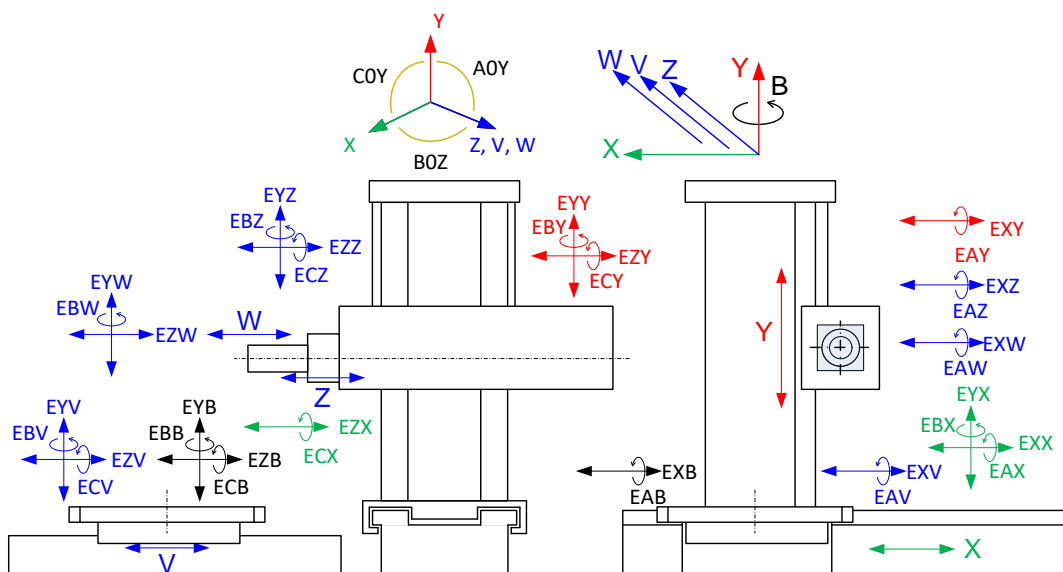
Změna velikosti volumetrické odchylky je prezentována na následujícím obrázku. Zde bylo na základě statistického plánování experimentu provedeno nastavení s cílem prokázat závislost volumetrické chyby na nastavení strategie měření. Nastavení jednotlivých parametrů měření je blíže popsáno v diplomové práci Ing. Zdeňka Žáka a publikaci [62].



obr. 45 Zobrazení velikosti volumetrické odchylky stroje MCV754 QUICK v závislosti na typu výpočtového modelu a nastavení strategie měření [62]

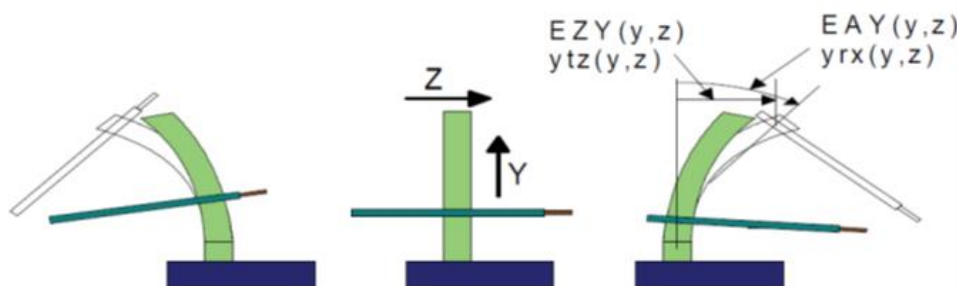
### 2.3.2 Horizontální frézovací a vyvrtávací stroj

Z obr. 46, na kterém je znázorněný horizontální frézovací a vyvrtávací stroj, je patrné rozložení pěti řízených os v kinematickém uspořádání WBVXYZWT. Při řešení volumetrické kompenzace translačních os je možné hodnotit 21 geometrických chyb (obr. 46) skládající se z kinematického řetězce WXZYT pro matematický model FRB (Full rigid body) a nebo 23 geometrických chyb (obr. 47) pro matematický model FRB+T (Full rigid body + tilt parameter).



obr. 46 Schéma odchylek horizontálního frézovacího stroje dle ISO [23]

U obráběcích strojů typu horizontální frézovací a vyvrtávací stroj se setkáme s chybami označenými na obr. 47 jako EYWY a EAWY. Tyto chyby vznikají vlivem poddajnosti výsuvného vřeteníku/pinoly, kdy se mění poloha těžiště vůči uložení stojanu. Eliminací těchto chyb (využitím modelu FRB+T) je možné zvýšit kompenzaci přesnost stroje oproti modelu s 21 chybami až o 50 %. [12]



obr. 47 Schéma odchylek horizontálního frézovacího stroje dle modelu FRB+T [63]

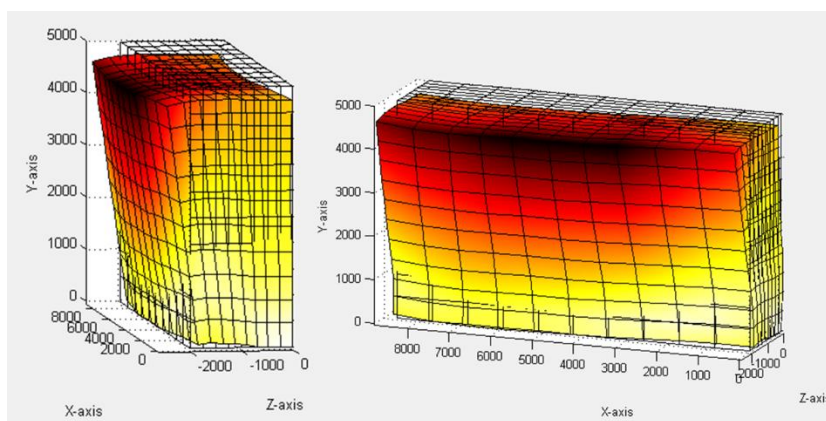
Na obr. 48 je znázorněn stroj, na který byla navržena metodika měření volumetrické přesnosti tříosých obráběcích strojů přístrojem LaserTARCER v rámci projektu TA04011406 „Využití progresivních technologií pro efektivní stavbu obráběcích strojů“. Na stroji byly zkoušeny nejen navržené strategie měření, ale také technologie bezdrátové komunikace mezi obráběcím strojem a měřicím přístrojem s cílem efektivnější a bezpečnější práce na stroji. Cílem této aktivity bylo minimalizovat počet kabelů mezi obráběcím strojem a měřicím zařízením za účelem snížení počtu přerušení měření z důvodu mechanické poruchy kabelů. Bezdrátová technologie na principu rádiové komunikace se v testované konfiguraci prokázala jako nevyhovující z důvodu vysokého počtu rušivých signálů vyskytujících se ve výrobních prostorách



obr. 48 Stroj HCW 3000, ŠKODA MACHINE TOOL [SKODA MACHINE TOOL]

Na obr. 49 je znázorněno grafické vyhodnocení volumetrické odchylky stroje HCW3000 pomocí modelu FRB+Elastic s aktivovanými kompenzacemi CEC, ENC

a Backlash. Jak je patrné, tak největší odchylka vzniká při maximálním výsuvu smýkadla (osa Z) v nejvyšší poloze na stojanu (osa Y).



obr. 49 Vyhodnocení volumetrické přesnosti stroje HCW3000

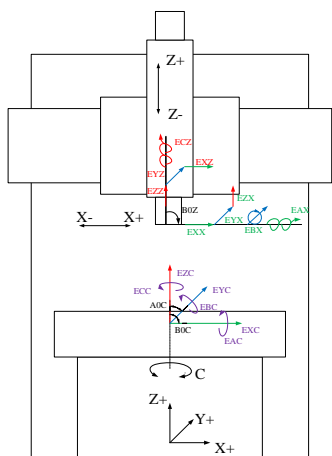
V rámci posuzování volumetrické přesnosti frézovacích a vyvrtávacích strojů jsou dlouhodobě zkoumány negativní vlivy změny okolního prostředí ovlivňující výslednou volumetrickou přesnost. Jedná se zde především o středně velké a velké obráběcí stroje, kde bývá zpravidla stabilita prostředí oproti malým obráběcím strojům výrazně horší. V rámci měření volumetrické přesnosti byly provedeny měření na strojích FUEQ 125WR5 (TOSKUŘIM-OS, a. s.), HCW 1000 a HCW 3 (ŠKODA MACHINE TOOLS, a. s.), WHN 130 (TOS Varnsdorf, a. s.), WFC 10, WFT 13R a WFT 13 (FERMAT CZ s. r. o.).

U této skupiny obráběcích strojů je nutné analyzovat:

- nastavení řídicího systému stroje,
- definování souřadného systému stroje,
- nastavení a konstrukce výměnných hlav,
- monitorováním okolního prostředí, zejména teploty okolí a vnitřních zdrojů,
- využití výpočetních modelů (full rigid body model – 21, Full rigid body model + tilt - 23 geometrických chyb),
- dimenzování přípravků a jejich vlivů na kvalitu měření.

### 2.3.3 Svislé soustruhy

Svislé soustruhy představují speciální skupinu strojů vzhledem k posuzování volumetrické přesnosti. I když se jedná o tříosé obráběcí centrum, tak jsou na měření kladeny speciální požadavky, a to zejména z důvodu absence osy Y (obr. 50).



*obr. 50 Schéma odchylek svislého soustruhu, svislý soustruh FORCETURN [TOSHULIN]*

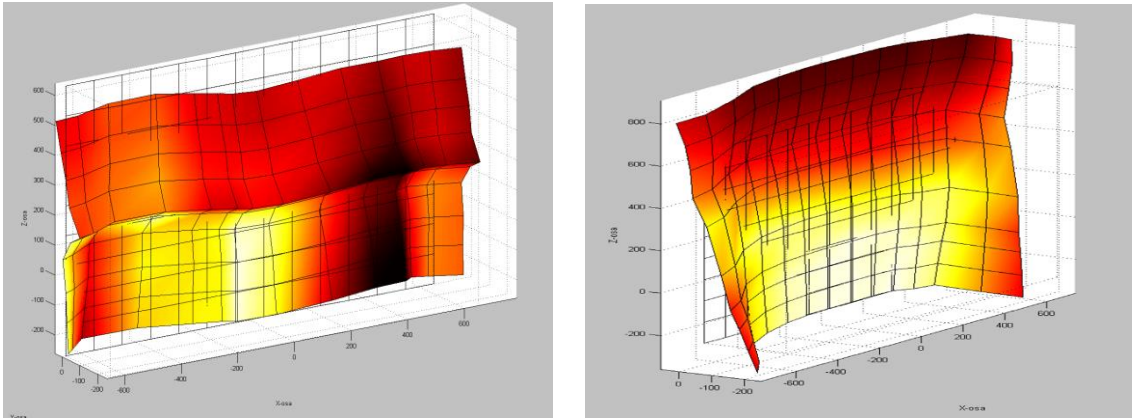
V rámci VaV činností byla v první fázi řešení navržena strategie měření volumetrické přesnosti stroje, kde byla Y osa simulována mechanickým přípravkem s definovanou roztečí 250 mm. Tento způsob měření vykazoval opakovaně chybu měření, která byla způsobena mechanickou poddajností přípravku (obr. 51).



*obr. 51 Přípravek na přesunutí optiky pro 2,5D model*

Grafické znázornění volumetrické odchylky je znázorněno na obr. 52., kde přesun přípravku (simulace osy Y) zanesl chybu větší než 0,1 mm. Z tohoto pohledu byla tato metoda vyhodnocena jako nevyhovující. Pomocí 2,5D modelu je možné posoudit na stroji 14 geometrických chyb.

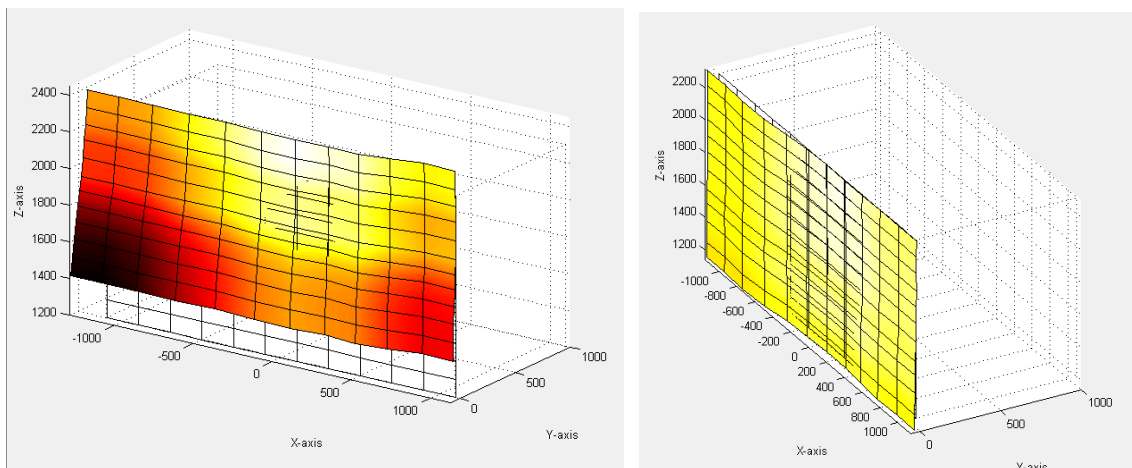




obr. 52 Měření volumetrické přesnosti pomocí 2,5D modelu

Na obr. 53 je znázorněno grafické vyhodnocení semi-volumetrické odchylky pomocí 2D modelu, tedy bez nutnosti použití mechanického přípravku. Navržená strategie měření byla nastavena tak, že simulované nejistoty měření nepřesáhly hodnotu  $0,5 \mu\text{m}$  a  $0,5 \mu\text{rad}$ . Z tohoto výpočtového modelu je možné hodnotit 9 geometrických chyb stroje.

Pojem semivolumetrická přesnost je zde použit, protože pohyb nástroje u svislých soustruhů je v rovině z důvodu absence Y osy a pro měření a vyhodnocení jsme použili měřicí zařízení LaserTRACER s modely 2D a 2,5D.



obr. 53 Měření volumetrické přesnosti pomocí 2D modelu

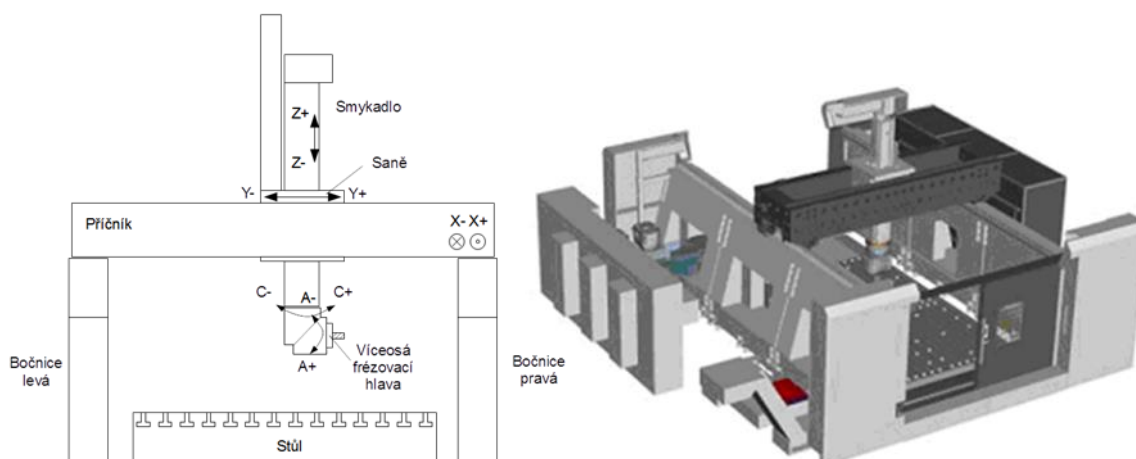
V rámci posuzování semivolumetrické přesnosti svislých soustruhů byly navrženy a otestovány dva způsoby měření. Jako vyhovující nastavení strategie měření byl vyhodnocen přístup s využitím metody 2D modelu. V rámci navazujících aktivit VaV činností bude záměrem tyto výsledky validovat a zaměřit se na další možnosti zvyšování

přesnosti měření formou eliminace negativních vlivů ovlivňujících výslednou semivolumetrickou odchylku.

V rámci řešení projektu LEVEL-UP: Protocols and strategies for extending the useful life of major capital investments and large industrial equipment, H2020, DT-FOF-06-2019 (2019-2023) je společně s dalšími partnery projektu TOSHULIN, a.s., Fraunhofer IWU a SIEMENS řešen jeden z úkolů zvýšení užitečných vlastností svislého stroje nasazením digitálního dvojčete volumetrické přesnosti.

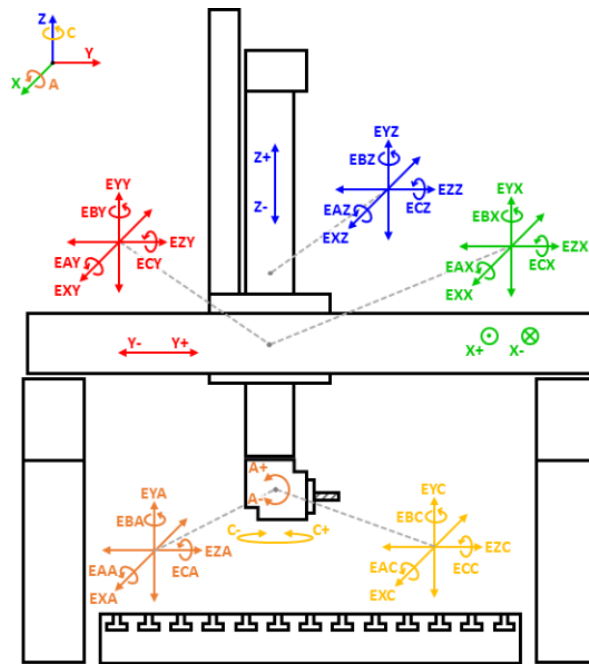
### 2.3.4 Víceosá CNC obráběcí centra

Na obr. 54 je schematicky znázorněno schéma stroje MCV 7032. Jedná se o portálové obráběcí centrum (horní GANTRY), na který byla navržena metodika měření volumetrické přesnosti přístrojem LaserTARCER v rámci projektu TA04011406 „Využití progresivních technologií pro efektivní stavbu obráběcích strojů“.



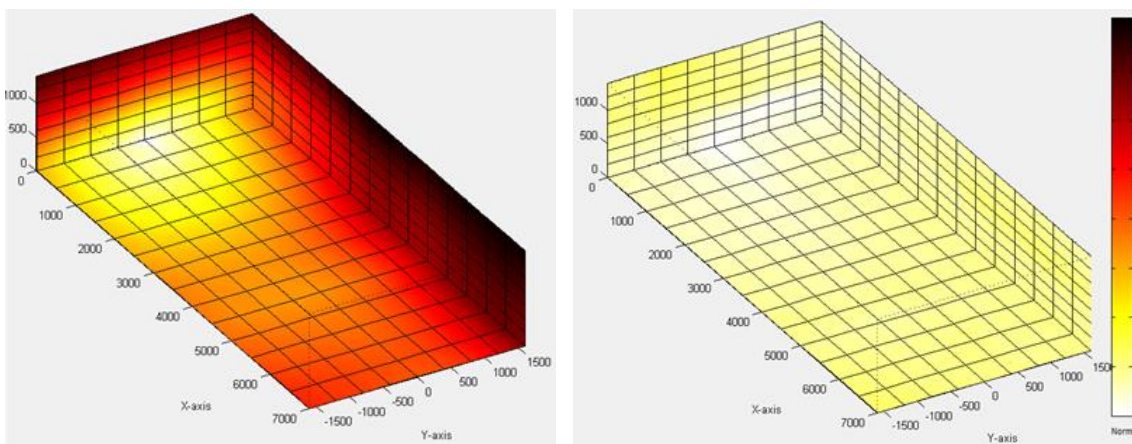
obr. 54 Schéma stroje MCV 7032, TAJMAC-ZPS

Na obr. 55 jsou znázorněny geometrické odchylky stroje v konfiguraci pro pětiosé obrábění. Dvě rotační osy jsou konfigurovány ve dvouosé frézovací výměnné hlavě. V první části měření víceosé kinematiky stroje bylo provedeno měření stroje pouze pro lineární pohyby.



obr. 55 Schéma geometrických odchylek stroje MCV 7032

Na obr. 56 je graficky interpretována volumetrická přesnost stroje MCV 7032. Vlevo je znázorněna přesnost stroje bez aktivovaných volumetrických kompenzací (VCS), vpravo je znázorněna volumetrická přesnost stroje s aktivovanými kompenzacemi VCS.



obr. 56 Grafické znázornění volumetrické přesnosti stroje MCV 7032, bez VCS, s VCS

Pro navržený postup identifikace volumetrických odchylek a implementace volumetrických kompenzací pomocí přístroje LaserTRACER můžeme dle obr. 56 konstatovat, že bylo dosaženo zlepšení volumetrické přesnosti stroje o přibližně 78 %.

Obecně lze konstatovat, že v oblasti pětiosých obráběcích center a volumetrické přesnosti je celá řada úkolů. Jedná se především o:



- stanovení intervalu volumetrických kompenzací v závislosti na ročním období, kdy se mění v místě instalace stroje pracovní podmínky,
- možnost snadného otevření opcí v CNC řídicím systému umožňující volumetrickou kompenzaci vlastního číslicově řízeného stroje,
- možnost plynule přecházet mezi více kompenzačními tabulkami nastavenými pro různé „zatížení“ stroje,
- posoudit vliv volumetrické kompenzace na výsledné pracovní přesnosti stroje s následnou predikcí rozměrové a tvarové přesnosti obrobku.

Tyto úkoly je nezbytné dořešit jak z pohledu výrobců obráběcích strojů, tak z pohledu výrobců řídicích systémů.

## **2.4 DÍLČÍ ZÁVĚR VLASTNÍHO PŘÍNOSU**

V oblasti posuzování volumetrické přesnosti obráběcích strojů byla doposud posuzována volumetrická přesnost dle normy ISO 230-6: 2002 – Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn (zkouška diagonálního přestavení). Měření přesnosti na diagonálách tělesa a vývoj efektivních metod měření CNC obráběcích strojů byly součástí disertačních prací [64], [65].

V současné době se začíná prosazovat posuzování volumetrické přesnosti na základě vyhodnocení maximální odchylky v celém pracovním prostoru nebo v jeho specifické části. Tento způsob vyhodnocení byl umožněn vývojem tzv. trackovacích laserů, které dokážou změřit výchylku v kartézském souřadném systému v daném bodě s dostatečnou precizností.

K vyhodnocení maximální volumetrické chyby je potom využíváno několik způsobů vyhodnocení. Prvním způsobem je měření volumetrické chyby v definované síti bodů pracovního prostoru stroje. Druhým způsobem je měření po obvodu pracovního prostoru a dopočítání chyb na základě matematického aparátu. Třetím způsobem je měření definovaných úseček ve třech se protínajících osách a dopočítání chyb opět na základě matematického aparátu. Posledním způsobem je pouze identifikace maximální volumetrické chyby bez možnosti podrobnějšího zpracování údajů o přesnosti stroje.

Pro výše uvedené přístupy měření volumetrických chyb výrobci měřicích zařízení dodávají metodické postupy zajišťující opakovatelnost měření, interpretovatelnost a správnost měření.

U měřicího zařízení LaserTRACER, které je v rámci předložené práce využíváno pro měření volumetrických odchylek obráběcích strojů, bylo nezbytné postupy přizpůsobit každému typu stroje. Důvodem bylo zejména to, že přístroj LaserTRACER byl původně vyvinut pro kalibraci souřadnicových měřicích strojů a následně aplikován na obráběcí stroje.

S přístrojem LaserTRACER je spojený výzkum na FSI od roku 2012. V rámci dílčích výzkumných aktivit bylo testováno jeho nasazení na obráběcích strojích s cílem aplikovat volumetrické kompenzace a zvyšovat tak pracovní přesnost obráběcích strojů. V laboratořích ÚVSSR byly zkoušky realizovány na stroji MCV 754QUICK (dále jen MCV) s řídicím systémem Siemens SINUMERIK 840 Dsl.

Koncem roku 2013 byla úspěšně aktivována volumetrická kompenzace na stroji MCV, kterou lze považovat za jednu z první volumetrickou kompenzaci v ČR na základě VCS tabulek. Od roku 2014 byla realizována měření volumetrické přesnosti portálových obráběcích center (ve třech osách). Od roku 2015 byla realizována měření na horizontálních vyvrtávacích a frézovacích strojích a od roku 2016 postupně svislé soustruhy a pětiosé obráběcí centra. V rámci jednotlivých měření byly navrženy strategie měření závislé od kinematického řetězce stroje a jeho velikosti, byly navrženy jednoúčelové přípravky a postupy měření na strojích, které vedly k efektivnějšímu měření a úspěšné volumetrické kompenzaci.

Na základě postupně budovaného know-how byly identifikovány negativní vlivy ovlivňující naměřené hodnoty délek a následně výsledné průběhy a velikosti jednotlivých chyb. Bylo nezbytné navrhnout vlastní postupy měření volumetrické přesnosti s cílem snižovat nejistotu měření. Jednalo se především o snižování časové náročnosti měření, kterou se podařilo snížit až o 58 %, a dalším způsobem je možné docílit odhadem celkové úspory o 76 %. Na základě tohoto výsledku je možné garantovat uživateli měření a kompenzaci stroje o rozměru  $20000 \times 4000 \times 2000$  mm v rámci jednoho pracovního dne. Dalším významným negativním vlivem byla identifikována teplota, která vykazuje v průběhu měření proměnlivé chování. To je dáno působením jak vnějších, tak vnitřních zdrojů tepla. V oblasti výzkumu byly sledovány zejména změny na posuvových osách stroje a s tím spojené dilatace. Ty se následně projeví zkreslením výsledků, které jsou blíže popsány v publikaci [66].

V rámci aktuálně probíhajícího výzkumu je cílem se zaměřit na dekompozici volumetrických chyb do dílčích chyb, které budou dále využity pro objektivě orientovanou kompenzaci.

Dále bude výzkum směřován do identifikace a popisu volumetrické chyby pětiosých obráběcích center.

### **3 SOUČASNÝ STAV A PŘÍNOS AUTORA KE STAVU POZNÁNÍ V OBLASTI SOFTWAREVÝCH KOMPENZACÍ OBRÁBĚCÍCH STROJŮ**

*Tato kapitola obsahuje výsledky publikované v knize CNC konstrukce obráběcích strojů (s autorovým podílem) [67] (100 %). Prezentované výsledky vznikly ve spolupráci s autory (uvedeno abecedně) Ing. Michal Holub Ph.D., Ing. Josef Knobloch M.Sc., Ing. Tomáš Marek, Ing. Jan Vetiška, Ph.D.*

#### **3.1 ÚVOD V OBLASTI SOFTWAREVÝCH KOMPENZACÍ**

Softwarové kompenzace jsou dnes nedílnou součástí každého CNC obráběcího stroje a jejich význam se stále zvyšuje společně s rostoucími požadavky na přesnější a kvalitnější výrobu. Díky vývoji nových technologií, a to především výkonnějšímu výpočtovému jádru je možné využívat v obráběcích strojích stále více výpočtů orientovaných na zpřesnění výroby, aniž by to zpomalilo jejich výkonnost. Právě vhodným využitím dostupných metod lze zvýšit jejich geometrickou přesnost až o 60 %, při zachování jejich výkonnosti [67].

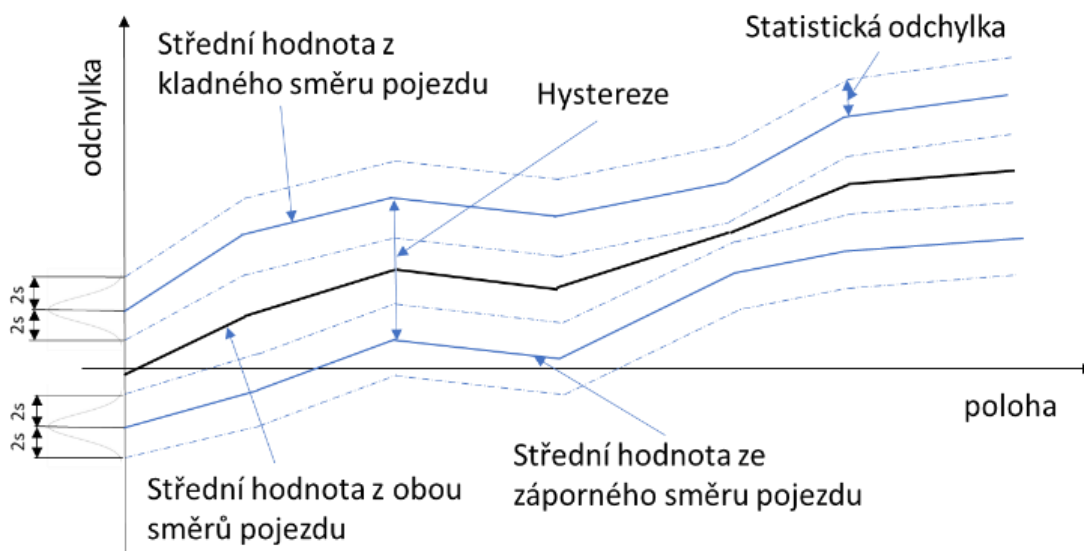
Kompenzace u CNC obráběcích strojů lze vyjádřit jako souhrn postupů, jejímž cílem je zlepšit a zdokonalit výkonnost jiných funkcí. U obráběcích strojů jsou to např. chyby vzniklé již při samotné výrobě jednotlivých komponent stroje, montáži dílčích uzlů a celého stroje, chyby vzniklé od řídicího systému (řízení), opotřebením vzniklým během provozu, chybami od vnitřních a vnějších zdrojů tepla, statické a dynamické poddajnosti stroje a dynamiky pohonů a řízení [68].

Kompenzace lze tedy rozdělit na chyby vzniklé bez silového zatížení a pod silovým zatížením a dle příčiny vzniku chyby na geometrické, dynamické a teplotní.

#### **3.2 KOMPENZACE GEOMETRICKÝCH CHYB**

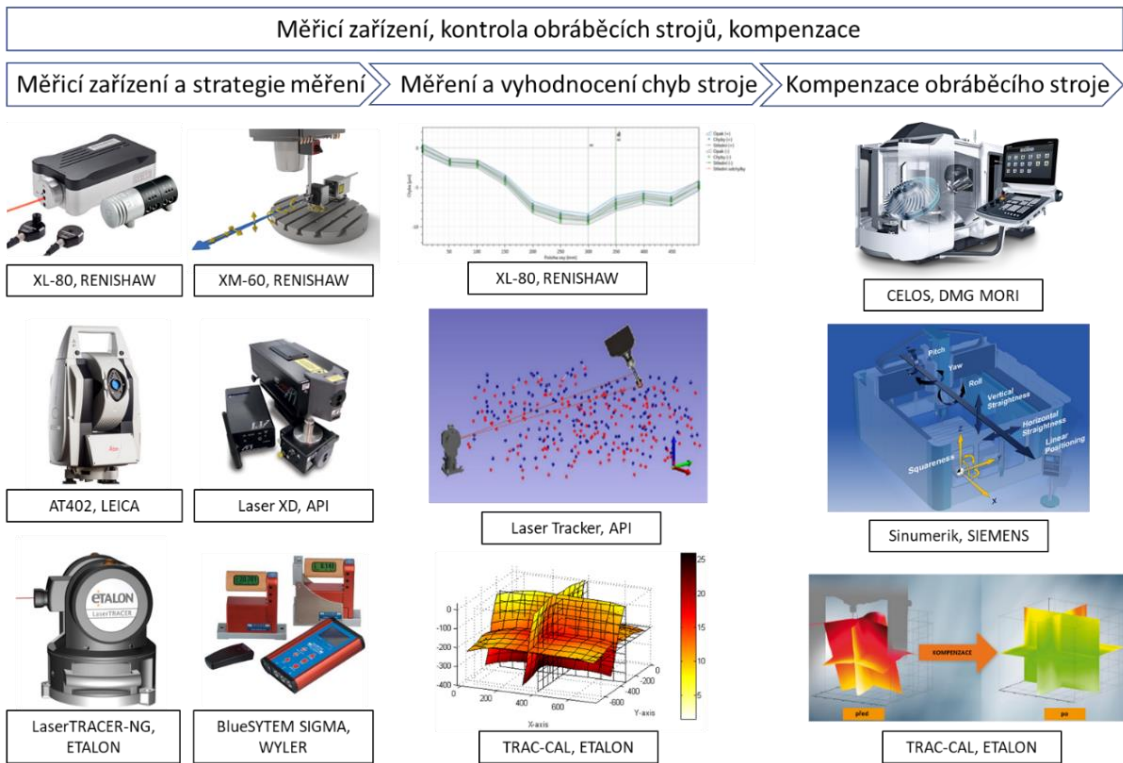
K výše již uvedeným systematickým chybám, které jsou za stejných podmínek opakovatelné a je možné je korigovat a kompenzovat, přistupují i chyby náhodné. Tyto náhodné chyby mají zpravidla statistický charakter a jsou blíže popsány v rámci kapitoly 5.2 publikace [67]. Při uvádění stroje do provozu jsou zjišťovány systematické chyby, ty mohou měnit svoji velikost i orientaci. K popisu těchto chyb je potřeba využít statistické charakteristiky. Na obr. 57 je uveden příklad výsledku vyhodnocení měření přesnosti

a opakovatelnosti najetí do polohy u CNC obráběcího stroje. Vedle střední hodnoty pro oba směry je z několika běhů při stejných podmínkách počítáno rozpětí  $2s$  nebo  $3s$  dle použité normy (ISO 230-2:2014, VDI/DGQ 3441:1977). Rozdíl středních hodnot pro oba směry představuje hysterezi, která může vzniknout např. vlivem třecích sil a vůlemi v mechanismu.



obr. 57 Znáznornění výsledku a interpretace chyby najetí do polohy [30]

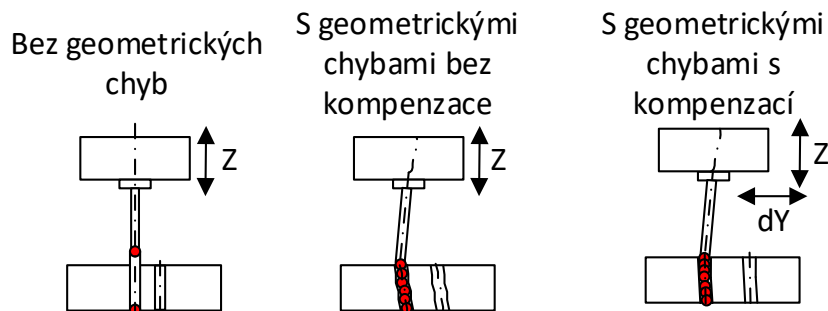
V této kapitole budou dále naznačeny a vysvětleny postupy pro zavádění softwarových korekcí do řídicího systému obráběcího stroje získaných z naměřených a zpracovaných hodnot, jak je zobrazeno v předchozím obrázku. Celý proces zavádění korekcí do stroje je schematicky zobrazen na obr. 58. Proces je popsán ve třech krocích, a začíná volbou měřicího zařízení přes měření a vyhodnocení na stroji až do fáze zavádění korekcí do stroje.



obr. 58 Postup zavádění kompenzací do obráběcího stroje [30]

Na obráběcí stroje jsou nasazovány řídicí systémy od různých výrobců, mezi které patří SIEMENS, FANUC, HEIDENHAIN, FAGOR, FIDIA, BOSCH, BECKHOFF, MITSCHUBISCHI a další. Také sami výrobci strojů si dělají vlastní nadstavby řídicího systému, kde potom používají vlastní cykly například pro výpočet korekcí, způsobu interpolací atd. Mezi tyto výrobce patří například MAZAK s řídicím systémem MAZATROL, OKUMA s řídicím systémem OSP. Postupy zavádění korekcí do stroje jsou prezentovány na řídicím systému SIEMENS Sinumerik 840D sl.

Ukázka obecného principu kompenzace je zobrazena na obr. 59 na příkladu vrtání děr [69]. V ideálním případě se bude pohybovat nástroj kolmo k upínací desce (obrobku) bez žádných přímočarostních či úhlových chyb. U vrtání můžeme zanedbat chybu najetí do polohy v ose  $E_{zz}$  pohybu nástroje.



obr. 59 Grafické znázornění obecného principu kompenzace geometrických chyb [30]

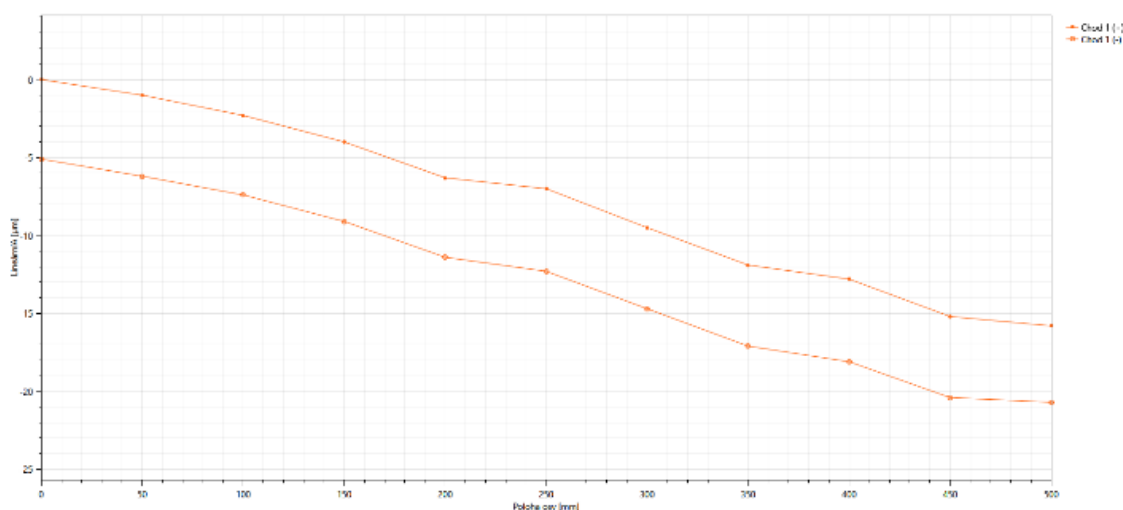
V reálné aplikaci se setkáme se všemi chybami, které pro danou osu umíme popsat. Vzniká tak otvor s rozměrovými i geometrickými odchylkami. Jak bylo popsáno výše, cílem kompenzace je zlepšit nebo zdokonalit výsledný rozměr a polohu vrtaného otvoru. Zde je ukázka využití „průhybové kompenzace“, s cílem eliminovat chyby polohy osy otvoru (obr. 59). Tzn., že při známé odchylce  $dY$  na poloze  $Z$  budeme tuto odchylku v záporném smyslu přidávat k pohybové ose  $Y$ . Tím bude dosaženo co nejlepší možné vzájemné polohy osy nástroje a výsledné osy díry v rovině  $Y-Z$ . Zápis této chyby do řídicího systému je popsán v následujících odstavcích.

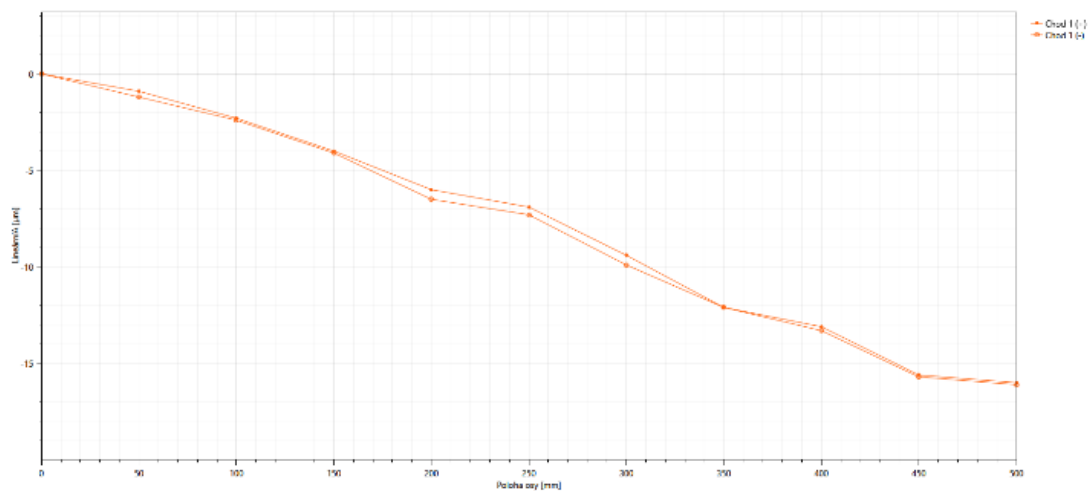
### 3.3 STANDARDNÍ TYPY KOMPENZACÍ NA CNC OBRÁBĚCÍCH STROJÍCH

#### 3.3.1 Backlash

I přes vymezení vůlí v KŠM (Kuličkový Šroub s Maticí) se v něm při pohybu v ose vyskytují vůle (odlehnutí). Je to dáno předepnutím v závitech matice, které nemůže být velké kvůli pasivním odporům a tím i generování tepla.

Během přenosu síly mezi pohyblivou částí stroje a její pohonem - např. kuličkovým šroubem a jeho uložením – se vyskytují vůle při různých směrech zatížení. Naopak při úplném mechanické nastavení bez vůlí dojde ke dramatickému zvýšení opotřebení stroje a vzniku tepla. Mechanické vůle způsobují odchylky v reverzní dráze os nebo vřeten s nepřímými měřicími systémy (obr. 60). To znamená, že v případě změny směru bude osa reagovat v závislosti na velikosti vzniklé vůle. Tyto vůle jsou kompenzovány funkcí dále uvedenou pod názvem Backlash.





obr. 60 Grafické znázornění chyby Backlash [30]

Backlash je možné do řídicího systému zadat několika způsoby. První možnost je využít strojního parametru MD32450 \$MA\_BACKLASH a zadat Backlash jako konstantu pro vybranou osu. Na obr. 60 je vidět chyba vůle, která byla pomocí parametru MD32450 eliminována. Hodnota Backlash byla v tomto případě rovna 5  $\mu\text{m}$  a byla v celém rozsahu osy konstantní.

Druhou možností je využít SAG kompenzace a tabulky CEC, která bude popsána v následujícím kroku a eliminovat chybu vůle formou oboustranné kompenzace. Tento typ kompenzace je blíže popsán v následující části této kapitoly. Výhoda prvního řešení je zadání pouze jedné konstanty. Při nelineárním chování je potom výhodnější zanést vůle formou tabulky CEC.

### 3.3.2 Kompenzace stoupání šroubu a chyby odměřování

Lineární odchylky, jako odchylka stoupání šroubu je základní kompenzací prováděnou u CNC obráběcích strojů. Chybou polohy se všeobecně rozumí velikost rozdílu mezi hodnotou skutečnou a požadovanou v jednotlivých pohybových osách. Tyto chyby závisí jednak na přesnosti vlastní osy, tak na pružných deformacích pohonu související s tíhovými a setrvačnými silami, na třecích silách, výskytu trhavých pohybů u strojů s kluzným vedením atd.

Zkouška přesnosti najetí do polohy je definována příslušnými normami, pro nás např. ČSN ISO 230-2:2014, VDI/DGQ 3441:1977. Při zkoušce najíždí stroj několikrát v každé kontrolované ose do předem stanovené polohy, a to v obou směrech. Normy zpravidla



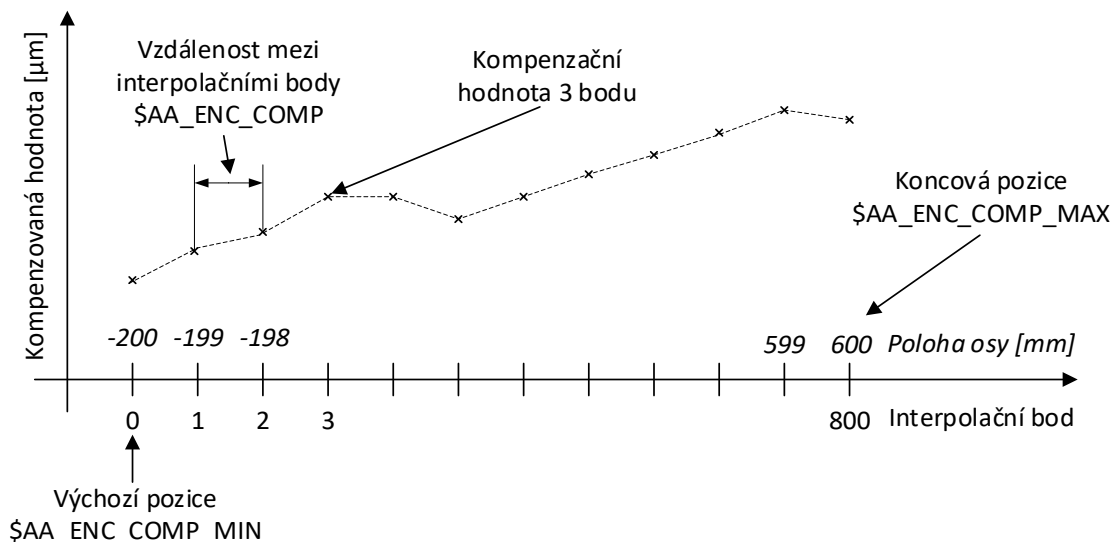
umožňují více možností nastavení strategií měření. Po provedené zkoušce přichází statistické zpracování naměřených dat a výpočet korekčních hodnot. Ty jsou potom následně zadávány do řídicího systému stroje dle zvoleného typu kompenzace a navržené strategie měření.

Jednou z možností kompenzace chyby lineární a rotační osy je využít tzv. interpolační kompenzace, do kterých spadá kompenzace chyby stoupání šroubů a chyby odměřování. U řídicího systému Siemens jsou chyby označovány jako LEC a MSEC. (*LEC* – leadscrew error compensation a *MSEC* – measuring system error compensation). Kompenzační hodnoty se zadávají do systému formou tabulek, které se buď zadávají manuálně nebo lze pomocí různých softwarových řešení generovat podprogramy, které si automaticky načtou a zapíší tabulku do řídicího systému stroje. Zde je nutné brát v potaz, že toto automatické načítání tabulek může fungovat pouze pro dané verze řídicího systému s příslušným service packem. Kompenzace MSEC je dále v řídicím systému stroje označována pod zkratkou ENC\_COMP a přes tento parametr je kompenzace postupně nastavována a aktivována.

Kompenzací ENC\_COMP lze provádět pouze jednosměrné kompenzace. V případě, že je ze zkoušky zjištěna i chyba vůle, je možné využít v kombinaci s ENC\_COMP kompenzací Backlash.

Aktivace ENC\_COMP spočívá v postupném nastavení jednotlivých parametrů. V první řadě se jedná o parametr definující počet kompenzovaných bodů na ose *MM\_ENC\_COMP\_MAX\_POINTS* []. Dále jsou to specifické parametry pro měřicí systém, které jsou součástí kompenzační tabulky; *\$AA\_ENC\_COMP* [] – vypočtená kompenzační hodnota; *\$AA\_ENC\_COMP\_STEP* [] – vzdálenost mezi interpolačními body; *\$AA\_ENC\_COMP\_MIN* [] – začátek kompenzace; *\$AA\_ENC\_COMP\_MAX* [] – konec kompenzace; *\$AA\_ENC\_COMP\_IS\_MODULO* [] – nastavení pro rotační osy. [70]

Na obr. 61 je uveden příklad pro měření přesnosti a opakovatelnosti najetí do polohy CNC lineární osy X.



obr. 61 Grafické znázornění kompenzace ENC [30]

Z naměřených dat jsou následně vypočteny korekční hodnoty s následujícím zápisem do řídicího systému stroje. Ukázka zápisu do řídicího systému stroje je zobrazena v následujícím textu.

```

%_N_AX_EEC_INI
CHANDATA(1)
$AA_ENC_COMP[0,0,X1]=0.003 ; první kompenzační hodnota (interpolační bod 0): +3 μm
$AA_ENC_COMP[0,1,X1]=0.01 ; druhá kompenzační hodnota (interpolační bod 1): +10 μm
$AA_ENC_COMP[0,2,X1]=0.012 ; třetí kompenzační hodnota (interpolační bod 2): +12 μm
...
$AA_ENC_COMP[0,800,X1]=-0.0 ; poslední kompenzační hodnota (interpolační bod 800): 0 μm
$AA_ENC_COMP_STEP[0,X1]=1.0 ; Vzdálenost mezi dvěma kompenzačními hodnotami 1.0 mm
$AA_ENC_COMP_MIN[0,X1]=-200.0 ; Start kompenzace -200.0 mm
$AA_ENC_COMP_MAX[0,X1]=600.0 ; Konec kompenzace +600.0 mm
$AA_ENC_COMP_IS_MODULO[0,X1]=0 ; Kompenzace bez funkce modulo
M17

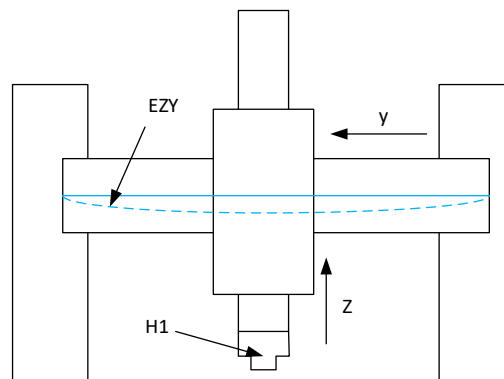
```

### 3.3.3 Kompenzace SAG

V předchozí kapitole byla popsána kompenzace v jedné ose tzv. MSEC. Ve velké řadě případů je kompenzace MSEC nedostačující a je vhodné zavádět korekce dvou závislých os.

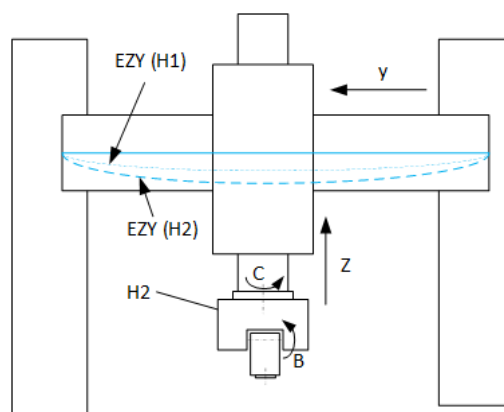
Ságová kompenzace se provádí, pokud hmotnost jednotlivých prvků stroje způsobí polohové posunutí a sklon pohyblivých částí, což vede k ohybu vedení a souvisejících strojních dílů. Kompenzační chyba sklonu se používá, když osy pohybu nejsou řádně vyrovnány ve správném úhlu (např. svisle). Jak se zvyšuje odchylka od nulové polohy, zvyšují se i chyby v polohování. Oba typy chyb mohou vznikat v důsledku přesouvání hmotností jednotlivých částí stroje, výměnou hlav, různorodostí obrobků a poddajností stroje. Naměřené korekční hodnoty jsou vypočítány na základě příslušných norem nebo vlastních algoritmů a během uvedení do provozu jsou do řídicího systému stroje uloženy

formou kompenzační tabulky. Během provozu stroje a pohybu os je příslušná hodnota interpolována mezi hodnotami tabulky „interpolační body“ (obr. 61). Pro každý pohyb v souvislé dráze existuje vždy jak základní osa, tak kompenzační osa. Pokud není kolmá osa  $y$  v souvislé dráze osy  $x$  a osy  $y$ , je tato nepřesnost kompenzována osou  $x$  v souvislé dráze. Na obr. 62 je znázorněn princip kompenzace portálového obráběcího stroje. Chyba přímocárnosti  $E_{ZY}$  je převážně zapříčiněna poddajností stroje, přičemž při posuvu saní po příčnku vzniká jeho průhyb způsobený zatížením od soustavy vřeteno – smykadlo – saně – příslušenství.



obr. 62 Kompenzace průhybu [30]

Tato kompenzace umožňuje celou škálu možností pro eliminaci následně vzniklých geometrických chyb. Dále je uveden příklad pro kompenzaci průhybu od změny zatížení výměnných hlav, kde bývají značné rozdíly v jejich hmotnostech. Na obr. 63 je zobrazen stroj s přímou výměnnou hlavou H1 o hmotnosti  $m_1$ , která má hmotnost 450 kg. Po výměně přímé hlavy za dvouosou frézovací hlavu H2 o hmotnosti  $m_2 = 1450$  kg dojde k většímu zatížení příčnku, a tedy i jeho větší deformaci. Tato poddajnost příčnku se projeví změnou křivky průhybu  $E_{ZY}$  (H2) oproti původní  $E_{ZY}$  (H1).



obr. 63 Princip kompenzace s více tabulkami [30]

Jako hlavní osa bude v tomto případě označena osa Y a kompenzovaná bude osa Z. Do kompenzační tabulky je nezbytné definovat osy, ale také začátek kompenzace, velikost kroku a směr.

Tyto kompenzace jsou označovány jako CEC kompenzace a lze je aktivovat pod parametrem `$MA_CEC_ENABLE []` a dále parametrem `$SN_CEC_TABLE_ENABLE []` aktivovat příslušnou tabulku. Současně je vhodné nastavit počet předpokládaných kompenzovaných bodů do tabulky `$MN_MM_MAX_POINTS []`. Další nastavení už je součástí kompenzační tabulky, kde se uvádí zbývající nezbytné nastavení. Kompenzační hodnota se zadává do parametru `$AN_CEC []`, nastavení základní osy se definuje v `$AN_CEC_INPUT_AXIS []`, vedlejší (kompenzované) se definuje v `$AN_CEC_OUTPUT_AXIS []`, opět je nutné nastavit velikost kroku `$AN_CEC_STEP []`, začátek kompenzace hlavní osy `$AN_CEC_MIN []`, konec kompenzace `$AN_CEC_MAX []`, směr základní osy pro kompenzaci `$AN_CEC_DIRECTION []` a pro rotační osy je zde parametr `$AN_CEC_IS_MODULO []`. [70]

- *Průhybová kompenzace*

Pro využití SAG kompenzace u průhybových kompenzací bude vypadat tabulka následovně.

```

%_N_NC_CEC_INI ;
CHANDATA(1) ;
$AN_CEC[0,0]=0 ; první kompenzační hodnota (interpolační bod 0); pro Z: ±0µm
$AN_CEC[0,1]=0.01 ; druhá kompenzační hodnota (interpolační bod 1); pro Z: +10µm
$AN_CEC[0,2]=0.012 ; třetí kompenzační hodnota (interpolační bod 2); pro Z: +12µm
... ;
$AN_CEC[0,100]=0 ; poslední kompenzační hodnota (interpolační bod 101); pro Z: ±0µm
$AN_CEC_INPUT_AXIS[0]=(AX2) ; základní osa Y
$AN_CEC_OUTPUT_AXIS[0]=(AX3) ; kompenzace v ose Z
$AN_CEC_STEP[0]=8 ; vzdálenost mezi interpolačními body 8.0 mm
$AN_CEC_MIN[0]=0 ; začátek kompenzace Y=0 mm
$AN_CEC_MAX[0]=800.0 ; konec kompenzace Y=800 mm
$AN_CEC_DIRECTION[0]=0 ; tabulka platí pro oba směry pohybu osy Y.
$AN_CEC_MULT_BY_TABLE[0]=0 ;
$AN_CEC_IS_MODULO[0]=0 ;kompenzace bez funkce modulo
M17 ;

```

- *Obousměrná kompenzace osy*

V případě že využijeme SAG kompenzace pro obousměrnou kompenzaci osy, tak bude kompenzační tabulka vypadat následovně. Parametr základní osy i vedlejší (kompenzovaná) osy budou stejné a odpovídat označení osy. A parametr nastavení pro směr bude jednou roven hodnotě 1 a podruhé hodnotě -1. Pro příklad frézovacího portálového obráběcího stroje bude pro výsuv osy smykadla z vypadat následovně.

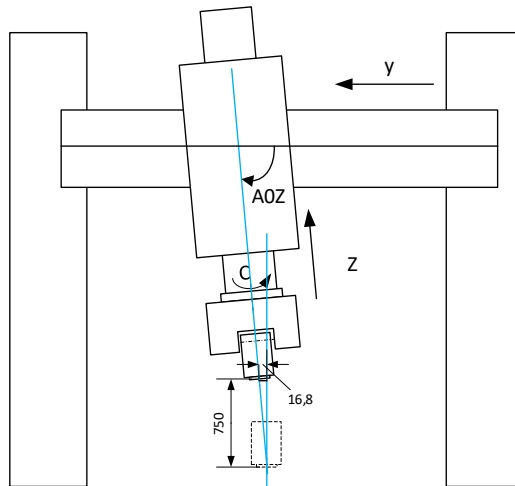
```

% N NC_CEC_INI ;
CHANDATA(1) ;
$AN_CEC[0,0]=0 ; první kompenzační hodnota (interpolační bod 0); pro Z: ±0µm
$AN_CEC[0,1]=0.01 ; druhá kompenzační hodnota (interpolační bod 1); pro Z: +10µm
$AN_CEC[0,2]=0.012 ; třetí kompenzační hodnota (interpolační bod 2); pro Z: +12µm
... ;
$AN_CEC[0,10]=0 ; poslední kompenzační hodnota (interpolační bod 11); pro Z: ±0µm
$AN_CEC_INPUT_AXIS[0]=(AX3) ; základní osa Z
$AN_CEC_OUTPUT_AXIS[0]=(AX3) ; kompenzace v ose Z
$AN_CEC_STEP[0]=75 ; vzdálenost mezi interpolačními body 75.0 mm
$AN_CEC_MIN[0]=0.0 ; začátek kompenzace v Z=0 mm
$AN_CEC_MAX[0]=750.0 ; konec kompenzace v Z=750 mm
$AN_CEC_DIRECTION[0]=1 ; tabulka je aplikována pouze v kladném směru osy Z.
$AN_CEC_MULT_BY_TABLE[0]=0 ;
$AN_CEC_IS_MODULO[0]=0 ; kompenzace bez funkce modulo

$AN_CEC[0,0]=0 ; první kompenzační hodnota (interpolační bod 0); pro Z: ±0µm
$AN_CEC[0,1]=0.01 ; druhá kompenzační hodnota (interpolační bod 1); pro Z: +10µm
$AN_CEC[0,2]=0.012 ; třetí kompenzační hodnota (interpolační bod 2); pro Z: +12µm
... ;
$AN_CEC[0,11]=0 ; poslední kompenzační hodnota (interpolační bod 11); pro Z: ±0µm
$AN_CEC_INPUT_AXIS[0]=(AX3) ; základní osa Z
$AN_CEC_OUTPUT_AXIS[0]=(AX3) ; kompenzace v ose Z
$AN_CEC_STEP[0]=75 ; vzdálenost mezi interpolačními body 75.0 mm
$AN_CEC_MIN[0]=0.0 ; začátek kompenzace v Z=0 mm
$AN_CEC_MAX[0]=750.0 ; konec kompenzace v Z=750 mm
$AN_CEC_DIRECTION[0]=-1 ; tabulka je aplikována pouze v kladném směru osy Z.
$AN_CEC_MULT_BY_TABLE[0]=0 ;
$AN_CEC_IS_MODULO[0]=0 ; kompenzace bez funkce modulo
M17 ;

```

Dále se SAG kompenzace využívají pro kompenzace chyby kolmostí (obr. 64). Kompenzace kolmosti jsou u řídicího systému Siemens zadávány pomocí CEC tabulek. Jedna osa je stanovena jako základní a druhá jako kompenzovaná. Příklad bude uveden na kompenzaci kolmosti např. osy Y a Z portálového obráběcího centra. Z naměřených hodnot získaných měřením pomocí laser interferometru, ballbaru nebo pomocí kalibračních kostek a úchylkoměrů získáme informaci o velikosti a orientaci kolmosti, která může být například 22,4 µm/m. Je nezbytné už při přípravě měření respektovat souřadný systém stroje a orientace os. V opačném případě bude u verifikačního měření výsledná hodnota chyby znásobena. Pro výsuv smykadla (osy Z) to znamená, že na délku výsuvu 750 mm musíme nejprve naměřenou chybu 22,4 µm/m přepočítat poměrem 750/1000 mm. Po vynásobení naměřenou hodnotou získáme hodnotu pro zadání korekce do řídicího systému stroje. V tomto případě bude hodnota zapsána na pozici 750 mm rovna 16,8 µm.



obr. 64 Ukázka kompenzace kolmosti [30]

Pro příklad frézovacího portálového obráběcího stroje bude korekční tabulka pro výsuv osy smykadla z vypadat následovně.

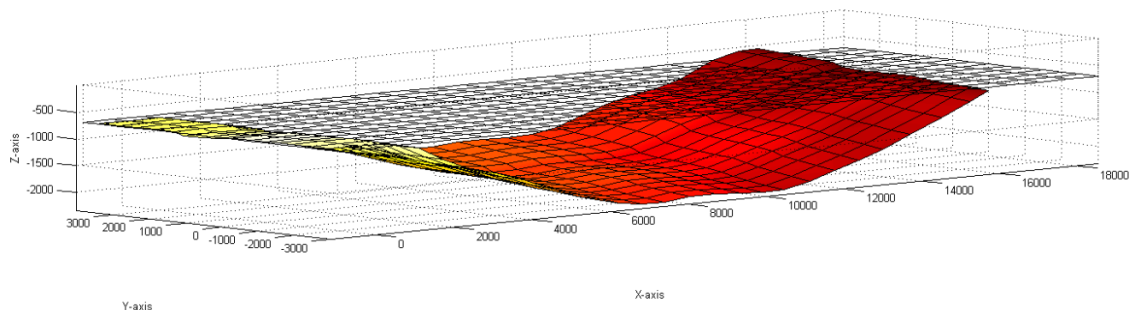
```

% N_NC_CEC_INI ;
CHANDATA(1) ;
$AN_CEC[0,0]=0 ; první kompenzační hodnota (interpolační bod 0); pro Z: ±0μm
... ;
$AN_CEC[0,100]=0.0168 ; poslední kompenzační hodnota (interpolační bod 11); pro Z: ±16.8μm
$AN_CEC_INPUT_AXIS[0]=(AX3) ; základní osa Z
$AN_CEC_OUTPUT_AXIS[0]=(AX2) ; kompenzace v ose Y
$AN_CEC_STEP[0]=750 ; vzdálenost mezi interpolačními body 750.0 mm
$AN_CEC_MIN[0]=0.0 ; začátek kompenzace v Z=0 mm
$AN_CEC_MAX[0]=750.0 ; konec kompenzace v Z=750 mm
$AN_CEC_DIRECTION[0]=0 ; tabulka platí pro oba směry pohybu osy Z.
$AN_CEC_MULT_BY_TABLE[0]=0 ;
$AN_CEC_IS_MODULO[0]=0 ; kompenzace bez funkce modulo
M17 ;

```

- *Kompenzace hodnot na 2D mřížce*

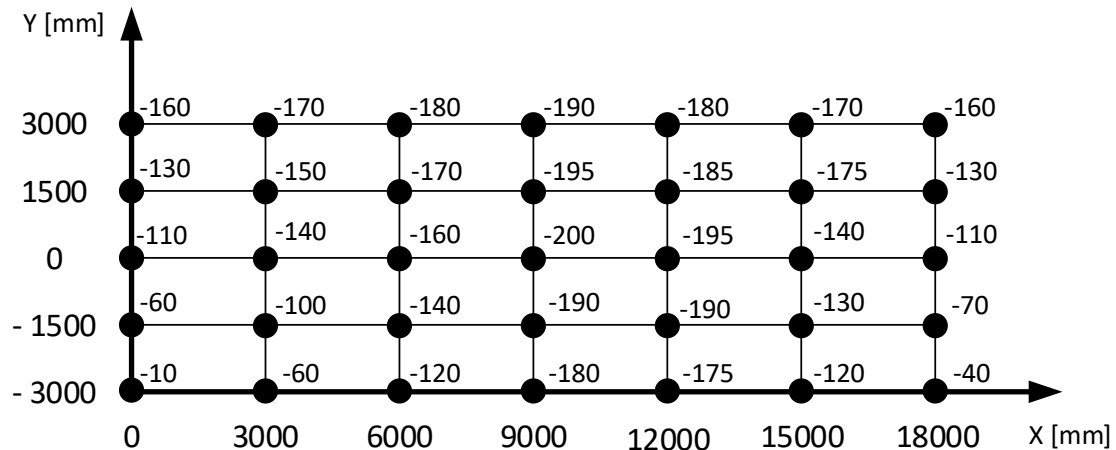
U strojů s velkými stoly může být výhodné použít kompenzaci hodnot na 2D mřížce (obr. 66). Na obr. 65 je zobrazena deformace roviny X-Y s vypočtenou (naměřenou) chybou v ose Z. Pro tento případ bude provedeno vysvětlení a ukázka nastavení kompenzací na 2D mřížce.



obr. 65 Grafická interpretace chyby Z v rovině X-Y [30]

Interpolační body s příslušnými hodnotami kompenzace v ose Z jsou rozmístěny na mřížce dle schématu v rovině X-Y. Hodnoty kompenzace ležícími mezi interpolačními

body jsou stejně jako u předchozích kompenzací dopočítány na základě lineárně interpolovaného řízení. Uváděný příklad podrobněji vysvětluje přípravu mřížky na rozjezdech stroje v ose x 18 000 mm a v ose Y 6000 mm. Celá mřížka je připravena pro velikost mřížky 5 x 7 (řádky x sloupce). Velikost kroku v ose X je tedy 3000 mm a v ose Y 1500 mm. Musí se brát v potaz maximální možný počet kompenzačních hodnot pro mřížku. Ta nesmí překročit celkový počet 2000 hodnot pro tento případ. [70]



obr. 66 Vytvoření kompenzační mříže [30]

Pro příklad kompenzace hodnot bude vypadat zjednodušený zápis následovně.

```

; funkční hodnota f_1(x) pro tabulku s indexem [0]
$AN_CEC[0,0]=-10
$AN_CEC[0,1]=-60
$AN_CEC[0,2]=-120
$AN_CEC[0,3]=-180
$AN_CEC[0,4]=-175
$AN_CEC[0,5]=-120
$AN_CEC[0,6]=-40

$AN_CEC[1,0]=-60
$AN_CEC[2,0]=-100
$AN_CEC[3,0]=-130
$AN_CEC[4,0]=-160

; funkční hodnota f_2(x) pro tabulku s indexem [1]
; funkční hodnota f_3(x) pro tabulku s indexem [2]
; funkční hodnota f_4(x) pro tabulku s indexem [3]
; funkční hodnota f_5(x) pro tabulku s indexem [4]

$SN_CEC_TABLE_ENABLE[0]=TRUE
$SN_CEC_TABLE_WEIGHT[0]=1.0
$AN_CEC_INPUT_AXIS[0]=(X)
$AN_CEC_OUTPUT_AXIS[0]=(Z)
$AN_CEC_STEP[0]=3000.0
$AN_CEC_MIN[0]=0.0
$AN_CEC_MAX[0]=18000.0
$AN_CEC_MULT_BY_TABLE[0] = 6
s číslem [t2]
$AN_CEC[6,0]=1.0
$AN_CEC[6,1]=0.0
$AN_CEC[7,1]=1.0
$AN_CEC[8,2]=1.0
$AN_CEC[9,3]=1.0
$AN_CEC[10,4]=1.0
$SN_CEC_TABLE_ENABLE[5]=TRUE
$SN_CEC_TABLE_WEIGHT[5]=1.0
$AN_CEC_INPUT_AXIS[5]=(Y)
$AN_CEC_OUTPUT_AXIS[5]=(Z)

; uvolnění f tabulek s kompenzačními hodnotami
; definování váhového faktoru pro f tabulky
; definování základní osy X
; definování kompenzace v ose Z
; definování velikosti kroku mezi interpolačními body
; start kompenzace v ose X=0
; konec kompenzace v X=18000
; Hodnoty tabulek f s indexem [t1] se násobí hodnotami v tabulkách g

; funkční hodnota g_1(x) pro tabulku s indexem [6]
; funkční hodnota g_1(x) pro tabulku s indexem [6]
; funkční hodnota g_2(x) pro tabulku s indexem [7]
; funkční hodnota g_3(x) pro tabulku s indexem [8]
; funkční hodnota g_4(x) pro tabulku s indexem [9]
; funkční hodnota g_5(x) pro tabulku s indexem [10]
; uvolnění g tabulek s kompenzačními hodnotami
; definování váhového faktoru pro g tabulky
; definování základní osy Y
; definování kompenzace v ose Z

$AN_CEC_STEP[5]=1500.0
$AN_CEC_MIN[5]=-3000.0
$AN_CEC_MAX[5]=3000.0
; definování velikosti kroku mezi interpolačními body
; start kompenzace v ose Y=-3000
; konec kompenzace v X=3000

```

Na základě předchozí definice kompenzace a výše uvedených tabulek je kompenzační hodnota  $D_z$  v poloze definované mřížky  $(x/y)$  počítána dle následujícího vztahu [70]:

$$D_z(x/y) = f_1(x) \cdot g_1(y) + f_2(x) \cdot g_2(y) + \dots \quad (2)$$

Pro výše uvedený příklad je potom kompenzační hodnota  $D_z(3000/-1500)$  vypočtena jako multiplikace každé hodnoty  $f_i(3000)$  a  $g_i(-1500)$ :

$$\begin{aligned} D_z(3000/-1500) &= f_1(3000) \cdot g_1(-1500) + f_2(3000) \cdot g_2(-1500) + f_3(3000) \\ &\quad \cdot g_3(-1500) + f_4(3000) \cdot g_4(-1500) + f_5(3000) \cdot g_5(-1500) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} D_z(3000/-1500) &= -60 \cdot 0 + (-100) \cdot 1 + (-140) \cdot 0 + (-150) \cdot 0 + (-170) \cdot 0 \\ &= -100 \mu m \end{aligned} \quad (4)$$

### 3.4 DÍLČÍ ZÁVĚR

Standardní softwarové kompenzace jsou již nedílnou součástí CNC obráběcích strojů, a to od fáze jejich zprovoznění, až po ukončení jejich produktivního cyklu. V této kapitole jsou prezentovány nejen standardní typy softwarových kompenzací, které jsou se strojem dodávány jako jeho standardní součást z výrobního závodu, ale také další možné typy, které jsou nasazeny z důvodu obrábění rozměrových nebo tvarových tolerancí vyžadují vyšší geometrickou přesnost stroje. Dále celá řada výrobců je schopna na přání zákazníka dodat stroj s tzv. zvýšenou přesností, kde nastavení stroje obsahuje zpravidla všechny typy výše uvedených kompenzací. Ty jsou potom do stroje zadávány dle typu stroje a zvyklostí ve firmě.

Vysoký potenciál představuje rozšíření výše uvedených kompenzací s pokročilými kompenzacemi, které jsou podrobněji popsány v následující kapitole.



## 4 PŘÍNOS AUTORA V OBLASTI VYUŽITÍ POKROČILÝCH SOFTWAREVÝCH KOMPENZACÍ

*Tato kapitola obsahuje výsledky prezentované na vědeckých konferencích a publikované v odborných časopisech. Dále obsahuje postupy a výsledky uplatněné certifikované metodiky č. 1201/2017 vzniklé v rámci projektu TA04011406 „Využití progresivních technologií pro efektivní stavbu obráběcích strojů“ s autorovým podílem 40 % a výsledky projektu Strojírenská výrobní technika a přesné strojírenství, DMS OP VVV CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_026/0008404. Prezentované výsledky vznikly spoluprací autorů Ing. Michal Holub Ph.D., doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D., Ing. František Bradáč, Ph.D., doc. Mgr. Jaroslav Hrdina, Ph.D., Ing. Josef Knobloch M.Sc., Ing. Tomáš Marek, Ph.D., Ing. Jan Vetiška, Ph.D., doc. Mgr. Petr Vašík, Ph.D. s autorovým podílem [66] (50 %), [71] (65 %), [2] (70 %), [72] (75 %).*

Využitím znalostí standardních softwarových kompenzací (kap. 5.3) a jejich rozšířením o pokročilé softwarové kompenzace lze docílit znalostní báze vedoucí v konečném důsledku ke zvyšování pracovní přesnosti v rozmezí o 20–45 % [73]. Nutnou podmínkou je však dodržení metodických postupů měření a provozování CNC obráběcích strojů.

### 4.1 VOLUMETRICKÉ KOMPENZACE

#### 4.1.1 Základní volumetrické kompenzace

Pod pojmem základní volumetrická kompenzace je myšleno, že na obráběcí stroj jsou nasazeny volumetrické kompenzace bez jakýchkoliv dalších geometrických kompenzací.

Tímto přístupem lze docílit zlepšení volumetrické přesnosti u tříosého obráběcího stroje až o **60 %** v optimálních okolních podmínkách [62] za nízké časové náročnosti. Časová úspora je dosažena díky absenci dodatečných měření, které jsou popsány v následující kapitole. V případě nasazení základní volumetrické kompenzace v kombinaci se standardními kompenzačními metodami (kap. 5.3) je možné dosáhnout zlepšení volumetrické přesnosti až **85 %** za předpokladu optimálních okolních a provozních podmínek [62].

#### 4.1.2 Efektivní nasazení volumetrických kompenzací

Získání „přesnějších“ hodnot (méně neovlivněných) vyžaduje zajistit stabilní okolní prostředí v průběhu měření a stabilní chování měřeného stroje. To je velice obtížné zajistit v běžném průmyslovém provozu stroje. Z těchto důvodů je možné pouze eliminovat vlivy zvyšující nejistotu měření.

- Strategie měření a proces měření [66]

Měření volumetrické přesnosti obráběcího stroje a jeho výsledky jsou jako každé měření zatíženy příslušnou nejistotou měření. Jedním z takovýchto faktorů na nejistotu měření je vliv měření teplot nezbytných pro správné vyhodnocení volumetrické chyby na obráběcích strojích. Z metodického postupu měření volumetrické přesnosti obráběcích strojů vychází požadavek na umístění teplotních snímačů co nejbližší k pohybovým osám obráběcího stroje a jejich odměřování. Tento požadavek lze uspokojivě plnit pouze ve výjimečných případech, a to například ve spolupráci s výrobcem obráběcího stroje, který stroj dopředu pro toto měření připraví. V běžném provozu není možné vždy odkrytovat stroj a umístit teplotní čidla přímo k lineární ose stroje. Náhradním řešením je umístit teplotní snímače co nejbližší k příslušné ose a předpokládat, že teplota nebude příliš odlišná.

V rámci případové studie byly provedeny čtyři režimy měření, přičemž referenční měření odpovídalo teplotně stabilnímu stroji jak pod kryty, tak v pracovním prostoru stroje. Zde byly vypočtené odchylky zanedbatelné, jelikož se teplota lišila maximálně o 0,4 °C. V dalších provozních režimech, které odpovídali reálným podmínkám měření volumetrické přesnosti stroje byly již rozdíly mezi systémy odlišné až o 3,6 °C. Z výsledků je patrné, že zaváděním kompromisů formou nevhodného umístění teplotních senzorů dochází k významnému ovlivnění výsledků, a tedy i kompenzačních hodnot.

V provedeném experimentu došlo k ovlivnění úhlové chyby  $E_{AY}$  o 48 %, chyby najetí do polohy  $E_{YY}$  až 37 % a u volumetrické chyby byly změny v rozmezí 8–12 %. (Popis chyb viz. obr. 13.)

- Časová náročnost [71]

Jednou ze sledovaných hodnot je doba měření. S rostoucím časem vstupuje do procesu měření větší počet možných vlivů zvyšujících výslednou nejistotu měření. Mezi tyto vlivy lze zařadit vibrace a rázy od okolí, změna vnějších tepelných zdrojů (topení, slunce, vrata)

a změny vnitřních tepelných zdrojů. Snahou je tedy navrhnout strategii měření takovým způsobem, aby bylo měření provedeno v co nejkratší době. U měření volumetrické přesnosti pomocí samonaváděcího laserového trackeru je možné postupovat několika způsoby.

V případové studii bylo provedeno ověření vhodnosti nasazení volumetrické kompenzace přístrojem LaserTRACER v režimu On-The-Fly. Jako první výsledek lze konstatovat, že touto metodou lze dosáhnout výrazných časových úspor, které se pohybují kolem 50 %. Dále lze z provedených měření konstatovat, že kontinuální měření metodou On-The-Fly neovlivňuje výsledky geometrických chyb. Toto bylo potvrzeno jak srovnáním s metodou trigger, tak zkouškou kruhové interpolace. Největší rozdíly lze pozorovat u chyb scaling error, které jsou ovlivněny teplotou okolí. Jelikož nebyly zkoušky provedeny v teplotně stabilní hale, lze tyto chyby přisuzovat právě rozdílu teplot. Hlavní sledované chyby jako kolmosti, tolerance polohy, přímosti a kruhovitost vykazovaly minimální rozdíly mezi kalibracemi provedenými v režimech trigger a On-The-Fly. Závěrem lze konstatovat, že metoda On-The-Fly má veliký potenciál při kontrole a kompenzacích volumetrické přesnosti obráběcích strojů.

- Kombinace kompenzací [72]

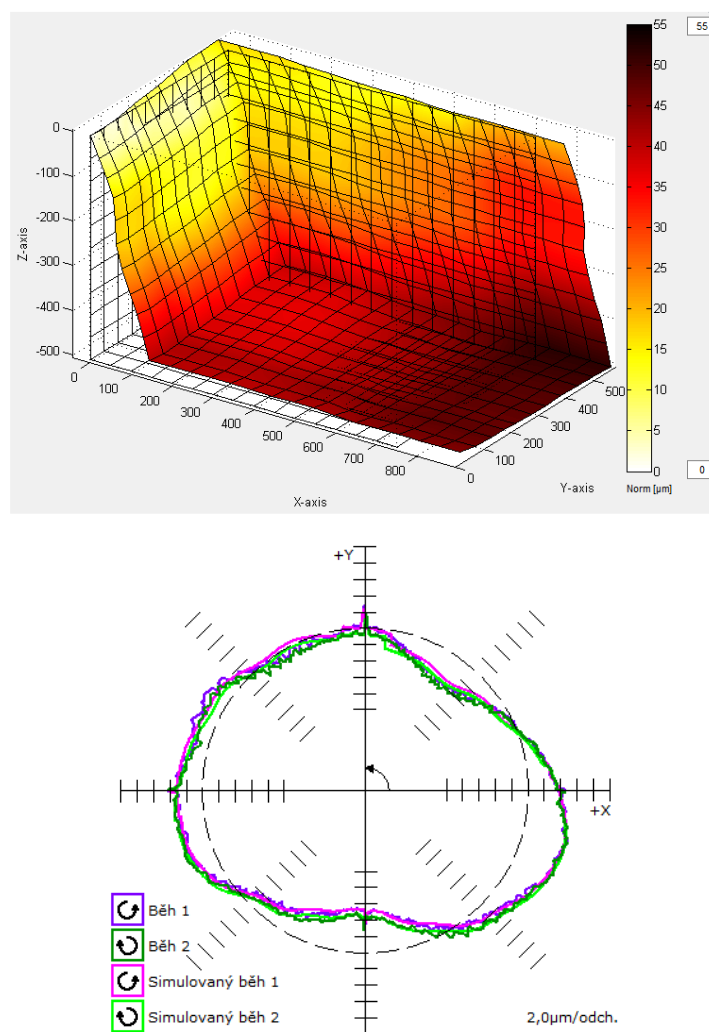
V některých případech je vyžadováno dosažení takových výsledků, které uživatelé stroje standardně nevyžadují. U některých výrobců se jedná o opci stroje se zvýšenou přesností. Zde jsou hranice geometrických tolerancí za možnostmi standardních postupů a je potom nutné eliminovat geometrické chyby systematicky, aby bylo dosaženo co největšího efektu snížení geometrických chyb.

Cílem těchto postupů je eliminace chyb způsobených odchylkami geometrie stroje, teplotních dilatací a dynamickou poddajností stroje. Za účelem zvýšení rozměrové a geometrické přesnosti obrobků byly v této studii testovány a posuzovány přístupy aktivace geometrických kompenzací typu najetí do požadované polohy a volumetrické kompenzace. Kalibrace a verifikace nastavených kompenzací byly ověřeny zkouškami geometrické přesnosti stroje přístroji Ballbar, Laser interferometr a LaserTRACER.

V této případové studii byla zvyšována geometrická přesnost stroje pomocí dvou vybraných kompenzací, kterou nabízí systémy Siemens Sinumerik. První kompenzací je cross error compensation (CEC) a druhou volumetric compensation system (VCS). K získání kompenzačních dat byly použity měřicí přístroje založené na laserové

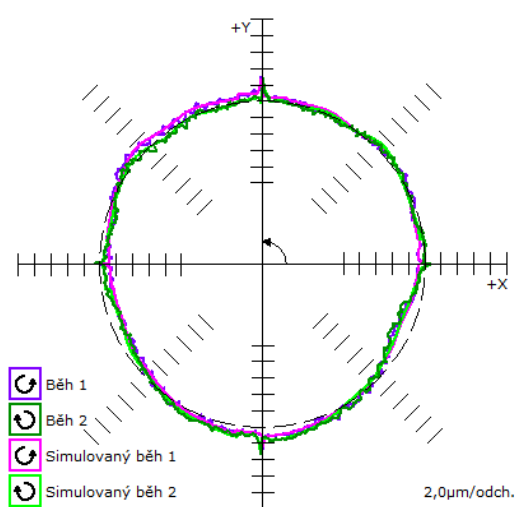
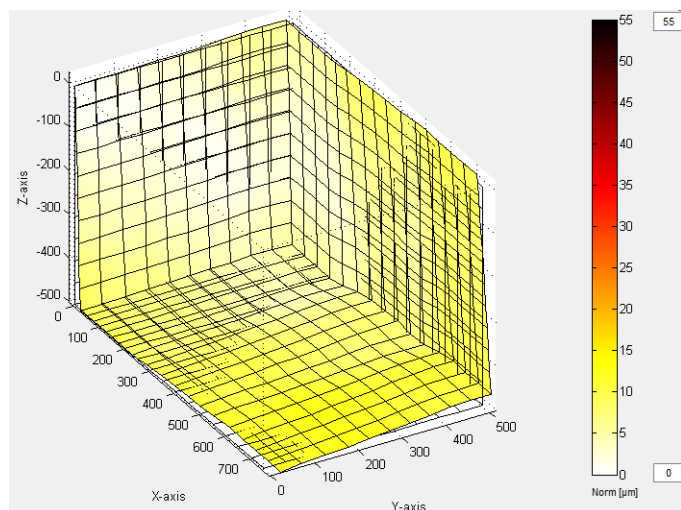
interferometrii laser inetrferometer XL-80 a LaserTRACER. Pro ověřování počátečního stavu CNC stroje a následných aktivací kompenzací byl použit přístroj Ballbar. Mezi posuzované parametry byly zvoleny prostorová chyba a chyba kruhovitosti.

Z provedené studie a získaných výsledků je zřejmé, že jednotlivé kompenzace a jejich kombinace ovlivňuje chybu kruhovitosti i prostorovou přesnost. Níže je ukázka dvou případů z celkového počtu šesti, kde byly realizovány odlišné přístupy nasazení volumetrické kompenzace. U stroje bez softwarové kompenzace byla naměřena volumetrická přesnost 52  $\mu\text{m}$  a kruhovitost v rovině XY 11,1  $\mu\text{m}$  obr. 67.



obr. 67 Ukázka volumetrické přesnosti stroje a kruhovitosti stroje bez softwarové kompenzace

V případě nejvhodnějšího nastavení postupu nasazení kompenzace došlo k dosažení výsledku volumetrické chyby 13  $\mu\text{m}$  a 5,7  $\mu\text{m}$  při zkoušce kruhové interpolace obr. 68. Zde byly provedeny postupné zavádění kompenzací pro chyby přímosti, polohování jednotlivých os s následnou kompenzací volumetrické chyby.



obr. 68 Ukázka volumetrické přesnosti stroje a kruhovitosti stroje v jednom z režimů nastavení SW kompenzace

### 4.1.3 Nové požadavky na CNC obráběcí stroje

Aplikace pokročilých technologií na obráběcí stroje sebou nese nové požadavky nejen na výrobce obráběcích strojů, ale také na výrobce řídicích systémů, které musí být do stroje implementovány. Může se jednat o aktivaci běžně dostupných opcí pro pokročilé kompenzace, ale také o potřebu vytvoření komunikačních kanálů pro propojení dalších podpůrných multisenzorických systémů. V rámci vývoje obráběcích strojů s tzv. zvýšenou přesností lze očekávat například konstrukční změny v oblasti teplotně symetrických koncepcí, snahu instalovat odměřování co nejbližně TCP, teplotně stabilizovat relevantní komponenty stroje, ale také zajistit dostatečně kvalitní základ a ukotvení stroje nebo osadit stroj dostatečným počtem senzorů.

## 4.2 PŘÍPADOVÉ STUDIE PRO OVĚŘENÍ POZNÁMEK Z KAP. 6.1

*Tato kapitola obsahuje výsledky prezentované na vědeckých konferencích a publikované v odborných časopisech. Dále obsahuje postupy a výsledky uplatněné certifikované metodiky „Metodický postup efektivní stavby obráběcích strojů“ č. 1201/2017 vzniklé v rámci projektu TA04011406 „Využití progresivních technologií pro efektivní stavbu obráběcích strojů“, s autorovým podílem 40 % a výsledky publikace (s autorovým podílem) [66] (50 %).*

### 4.2.1 Třiosé obráběcí centrum

V rámci následující kapitoly je podrobněji popsán vliv nevhodného měření teploty na výslednou volumetrickou chybu stroje realizovaném na třiosém obráběcím centru MCV 754 QUICK, s. n. 805, KOVOSVIT-MAS. Z výsledku lze zřetelně identifikovat jednotlivé chyby, na které má teplota vliv a celkový podíl na chybě volumetrické.

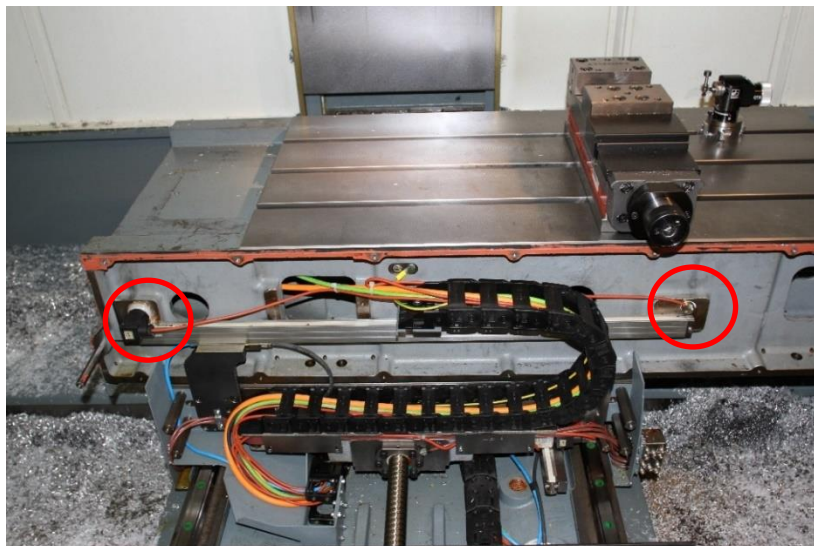
Pro měření třiosého obráběcího stroje je využito modelu Full rigid body (FRB), ze kterého lze získat až 21 parametrů chyb [2], [74]. Volumetrická chyba a její velikost je odlišná dle pracovního rozměru stroje [8]. Lze předpokládat, že s velikostí měřeného pracovního prostoru poroste i podíl chyby vzniklé od nevhodného měření teploty.

Teploty jsou měřeny na vybraných místech obráběcího centra pomocí systému TESTO Saveris a systému SMARIS. Na obr. 69 je zobrazena instalace teplotních snímačů na krytech obráběcího stroje pomocí TESTO. Tento postup rozmístění snímačů teploty je shodný s případem, kdy není dovoleno provést odkrytování stroje.



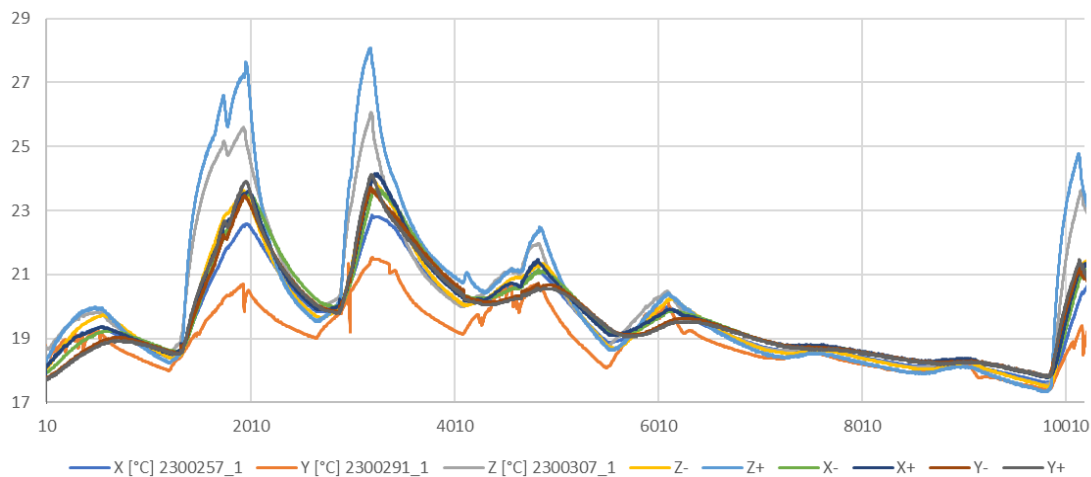
obr. 69 Vybrané pozice měření teploty pro osy X, Y a (systém TESTO) [29]

Správný postup měření shodný s metodickým postupem je provedeno pomocí teplotních čidel umístěných v těsné blízkosti odměřování obráběcího stroje (viz. kap. 6.1). Pozice měření teplot se nachází pod krytovaním strojních os. Zde je využit systém SMARIS (obr. 70), přičemž vybraná místa jsou zobrazena na následujícím obrázku.



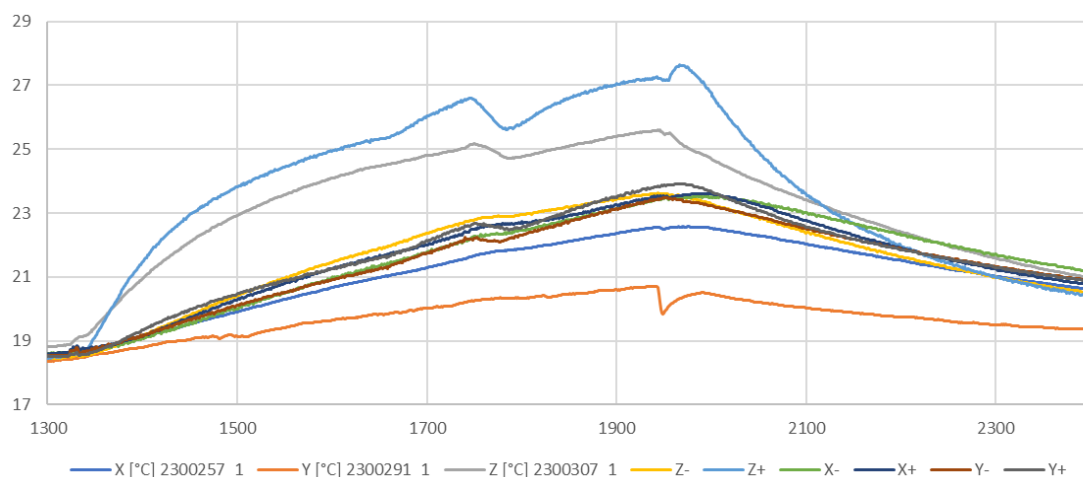
obr. 70 Vybraná místa měření systémem SMARIS [29]

Z následujících grafů (obr. 71) je patrný rozdíl mezi teplotními čidly trvale umístěnými na stroji pod jeho kryty a teplotními snímači umístěným postupem bez potřeby demontovat kryty obr. 71.



obr. 71 Naměřené hodnoty ze systémů SMARIS a TESTO [29]





obr. 72 Detail z režimu v pohybu všechny osy a vřeteno [29]

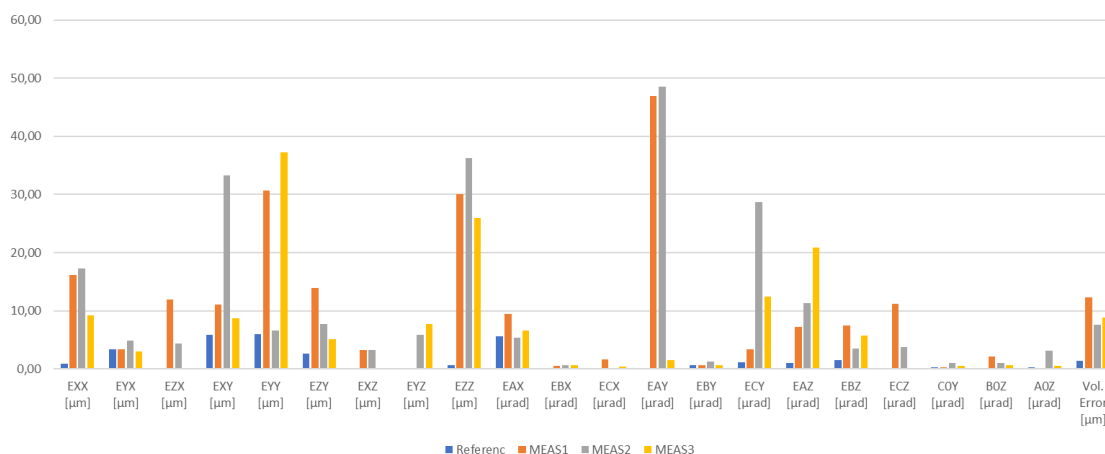
Tyto zkušební režimy jsou rozděleny do tří kategorií; stroj v klidu, v pohybu všechny osy, v pohybu všechny osy a vřeteno (obr. 72). V rámci zpracování dat byly analyzovány výsledky pro všechny režimy. U měření přístrojem LaserTRACER je logické, že bude pracovat v režimu pouze pohybu všech os. Je možné přiblížit výsledek i stavu, kde budou v provozu osy i vřeteno. Jedná se o stav, kdy stroj obráběl a v průběhu měření postupně chladl. Právě pro tyto režimy potom byly podrobně analyzovány rozdíly teplot mezi sestavou TESTO Saveris a SMARIS.

Současně bylo realizováno měření volumetrické přesnosti obráběcího stroje včetně jeho vyhodnocení. Pro měření volumetrické přesnosti byl vybrán model FRB, ze kterého lze získat 21 geometrických chyb stroje. Měření bylo provedeno z šesti pozic LaserTRACER, přičemž celková doba kalibračního měření byla 83 min.

Koeficient teplotní roztažnosti odměřovacího systému (linear encoder) byl zvolen z katalogu výrobce. Na všech osách jsou linear encoder typu LS487C od výrobce Heidenhain s uvedeným koeficientem teplotní roztažnosti  $8 \mu\text{m}/(\text{m.K})$ .

Na obr. 73 jsou znázorněny procentuální změny u jednotlivých měření mezi systémy TESTO a SMARIS, a to pro všechny čtyři režimy měření. Rozdíly mezi naměřenými teplotami a vypočtenými chybami se pohybují až k 50 %. Výsledná volumetrická chyba se pohybuje pro všechny tři měření v rozmezí 7–12 %. Chybou měření jsou vždy zatížené chyby  $E_{XX}$ ,  $E_{YY}$  a  $E_{YY}$ , kde dosahují změny až 35 %. Z úhlových chyb se potom pohybuje změna až 50 % u  $E_{AY}$ .





obr. 73 Výsledky srovnání jednotlivých režimů 21 geometrických chyb a volumetrické chyby [29]

## Diskuze

Při měření volumetrických chyb obráběcích strojů je doporučeno umístit teplotní senzory co nejbližší k místu odměřování osy stroje. V případě, že to není možné, tak musíme počítat s ovlivněním výsledků, a to do velikosti až 50 %. Měření by se dalo považovat za správné také v případě, kdy teploty pod kryty stroje a v pracovním prostoru jsou shodné. To bylo prokázáno u referenčního měření. Je ale velmi málo pravděpodobné, že se s takovým to případem můžeme setkat. V našem případě byla dosažena shoda teplot na obou systémech pouze v režimu, když byl stroj v klidovém stavu (zapnuté pohony, ale osy se nehýbaly). Jakmile se spustil pracovní cyklus, začaly se projevovat změny měřených teplot na jednotlivých senzorech vlivem postupného zahřívání stroje. Tyto stavy odpovídají režimům měření 1 až 3.

Tyto chyby měření je možné identifikovat měřením diagnostickým systémem Ballbar, kde se tato chyba projevuje jako chyba pravítek. Otázkou je, jestli zavedením délkové korekce neovlivní volumetrickou přesnost stroje, nebo jiné z kompenzovaných geometrických chyb. Odpovědi na tyto otázky budou řešeny v dalším výzkumu.

## Dílčí závěr

Jednou z cest vedoucích k udržování nebo zvyšování výrobní přesnosti je využití pokročilých kompenzací. Jednou z možností je nasazení volumetrických kompenzací. Volumetrické kompenzace začínají být velice zajímavé jak pro výrobce, tak i pro jejich uživatele, a to z důvodu časové náročnosti měření. Důležitým předpokladem pro správné zavedení a aktivaci kompenzací je dodržování metodického postupu doporučeného od

výrobce. Ne vždy je ale možné tento postup striktně dodržet a je nutné zanést do procesu kompenzace kompromisy. Jedním z těchto kompromisů je umístění teplotních senzorů co nejbližše kontrolované ose stroje bez odkrytování. V tomto případě jsou do výpočtů jednotlivých geometrických odchylek zanášeny chyby od nevhodně zvoleného místa měření teploty. V prezentované případové studii byly nasazeny dva systémy pro měření teplot. SMARIS, který byl umístěn pod kryty stroje a systém TESTO umístěný v nejbližších možných místech dostupných bez nutné demontáže krytů. V rámci případové studie byly provedeny různé režimy měření, přičemž referenční měření odpovídalo teplotně stabilnímu stroji jak pod kryty, tak v pracovním prostoru stroje. Zde byly vypočtené odchylky zanedbatelné, jelikož se teplota lišila maximálně o 0,4 °C. V dalších provozních režimech byly již rozdíly mezi systémem TESTO a SMARIS odlišné až o 3,6 °C. Tyto režimy odpovídaly reálným podmínkám měření volumetrické přesnosti stroje.

Z výsledků je patrné, že zaváděním kompromisů formou nevhodného umístění teplotních senzorů dochází k významnému ovlivnění výsledků, a tedy i kompenzačních hodnot.

V provedeném experimentu došlo k ovlivnění úhlové chyby  $E_{AY}$  až o 48 %, chyby najetí do polohy  $E_{YY}$  až 37 % a u volumetrické chyby byly změny v rozmezí 8–12 %.

## 4.3 NÁVRH NOVÉ METODIKY MĚŘENÍ GEOMETRICKÉ PŘESNOSTI

### 4.3.1 Popis současného stavu

Neustálý vývoj měřicí techniky nabízí nový potenciál pro jejich uživatele získávat více informací o sledovaném procesu, získávat kvalitnější informace a případně s přístroji efektivněji pracovat, a tím dosáhnout také časové úspory při měření, zpracování a vyhodnocení dat.

Využití progresivních technologií jako Laser Tracker, inklinometry Wyler BlueSYSTEM, Spindle Error Analyzer, Laser interferometr, Ballbar a LaserTRACER představuje vysoký potenciál získat více informací, kvalitnější data a časovou úsporu při stavbě strojů a kontrole geometrické přesnosti strojů.

V oblasti stavby stroje a kontroly geometrické přesnosti obráběcího stroje **neexistuje ucelená koncepce**, která by:

- popisovala nasazení přístrojů LaserTRACER, Laser Tracker, BlueSYSTEM, SEA, Laser interferometr, Ballbar do stavby a kontroly CNC obráběcích strojů,

- stanovila jednoznačný postup a pravidla, která je třeba dodržet pro úspěšné řešení problematiky stavby strojů a kontroly geometrické přesnosti strojů,
- počáteční podmínky pro možnou implementaci progresivních technologií,
- definovala ucelené postupy pro správnou implementaci progresivních technologií do stavby a kontroly geometrické přesnosti CNC obráběcích strojů.

Metodika vyvíjená v rámci tohoto projektu měla za cíl systémovým způsobem odstranit výše uvedené nedostatky. Rovněž lze konstatovat, že v současné době u výrobců CNC obráběcích strojů neexistuje metodika, která by popisovala ucelené postupy měření pro nasazení přístrojů do stavby strojů a kontroly geometrické přesnosti CNC obráběcích strojů.

#### **4.3.2 Stavba obráběcích strojů**

Obor těžkých obráběcích strojů je v oblasti stavby strojů značně konzervativní. Ve stavbě strojů se u průmyslových partnerů používají shodné přístroje a metodické postupy řadu let až desetiletí. Měřicí zařízení jsou často mechanická nebo analogová. Pokud je používáno zařízení mající digitální výstup, často není tato možnost využívána. Obecně lze hlavní specifika měření ve stavbě strojů shrnout následovně:

- velké rozsahy měření při přísných tolerancích,
- malá sériovost strojů nebo stroje vyráběné na zakázku,
- nedostatek prostoru pro testování přístrojů a postupů,
- požadovaná snadná přepravitelnost přístrojů na místo montáže,
- jednoduchá obsluha a robustnost postupů i pro méně kvalifikovanou obsluhu.

Chybějící nebo obecně zadané metodické postupy vytváří prostor pro to, aby kontrolóři postupy upravovali dle potřeb dané situace. Ve výsledku často každý pracovník používá vlastní postupy, které jsou pak obtížně reprodukovatelné. Záznamy z výsledků měření nemají jednotnou formu a nejsou ani archivovány. Tento fakt omezuje získání informací z procesu stavby stroje a možnosti posouzení vlivu procesu stavby stroje na geometrickou a pracovní přesnost stroje. Dále je nezbytné podotknout, že mnohdy leží veškerá znalost na jedné osobě. Kvůli chybějící zastupitelnosti v kombinaci

s nearchivovanými postupy a výsledky představuje odchod takového pracovníka nenahraditelnou ztrátu.

V době řešení našeho projektu (rok 2014) byly využívány převážně následující přístroje:

- úchylkoměr a etalon přímosti / kolmosti,
- autokolimátor,
- analogové inklinometry nebo digitální inklinometry bez spárování se SW,
- mikroskop se strunou.

V rámci návrhu metodického postupu byly do procesu stavby obráběcích strojů nasazeny přístroje: Laser Tracker, inklinometry Wyler BlueSYSTEM a laser interferometr. Náš návrh metodiky reaguje na dostupnost výše uvedených měřicích zařízení, které je možné pro efektivní stavbu obráběcích strojů využít.

Využitím nových progresivních technologií, vytvořením postupů pro vybrané aplikace a návrhu zpracování a ukládání dat dojde k minimalizaci výše uvedených nedostatků a rizik, zejména pak odchodu klíčových pracovníků a používání zastaralé měřicí techniky.

#### **4.3.3 Geometrická přesnost CNC obráběcích strojů**

Geometrická přesnost CNC obráběcích strojů popisuje „kvalitu“ aktuálního stavu stroje. Posouzení geometrické přesnosti se provádí dvěma způsoby, a to přímým nebo nepřímým způsobem měření.

Nepřímý způsob hodnocení geometrické přesnosti stroje je posuzován podle obrobeného zkušebního kusu, který má jasně definovaný tvar a pracovní postup pro obrábění. Z takto provedené kontroly lze posoudit, zda je stroj v dobré nebo špatné kondici, popř. provést odhad v jaké z pracovních uzlů stroje vznikají příslušné odchylky od požadované geometrie.

Přímý způsob posouzení geometrické přesnosti spočívá v nasazení měřicího zařízení, pro měření a posouzení jedné či více geometrických odchylek pracovních skupin obráběcího stroje. Podstatnou výhodou tohoto přístupu je, že lze využít získané údaje pro výpočet korekčních hodnot, které je možno zanášet přímo do řídicího systému CNC obráběcího stroje. Zpravidla se jedná o měření a posouzení jedné geometrické odchylky (např. polohy, přímosti, kolmosti atd.). Po proměření této geometrické odchylky následuje její zanesení ve formě korekcí do stroje. Potom následuje úprava strategie

měření a posouzení další geometrické odchylky. Tento pracný a na znalosti náročný postup se opakuje za využití různých měřicích zařízení až do dosažení požadované geometrie stroje.

Nevýhodou výše uvedeného postupu je jeho časová náročnost. U malého CNC obráběcího stroje s tříosou kinematickou strukturou může tento proces trvat, v závislosti na počtu posuzovaných odchylek, až 5 pracovních dní. Pro tříosý CNC obráběcí stroj je možné popsat 21 geometrických odchylek a u horizontálních vyvrtávacích strojů až 23.

V rámci návrhu metodiky byly do procesu kontroly geometrické přesnosti nasazeny přístroje: Laser Tracker, Digitální libely, Spindle Error Analyzer, Laser interferometr, Ballbar, LaserTRACER.

Návrh metodiky reaguje na dostupnost výše uvedených měřicích zařízení, které je možné pro efektivní kontrolu obráběcích strojů využít.

#### **4.3.4 Charakteristika novosti metodiky**

Zásadní přínos a inovativní prvek rozpracované metodiky spočívá ve vzájemném provázání dílčích poznatků a funkcionalit do jednoho celku „progresivní měřicí technologie – CNC obráběcí stroj“. Je třeba konstatovat, že některá uvedená řešení ve výzkumných zprávách jsou v obecném měřítku známá a je snaha tyto obecné znalosti využívat. Nicméně právě jejich společná synergie a přímá aplikace v oblasti stavby a posuzování geometrické přesnosti obráběcích strojů představuje novost a inovaci, která v této oblasti není doposud uceleně používána.

Nově navržená metodika umožní docílit správného vyhodnocení a nasazení korekcí a kompenzací jak ve fázi mechanického vyrovnání komponent strojů (stavba strojů), tak zavádění korekce do řídicího systému stroje (geometrická kontrola strojů).

Novost lze spatřovat i v tom, že navržený postup je možné uplatnit na libovolnou kinematickou strukturu CNC obráběcího stroje, který bude osazen libovolným řídicím systémem. Podle typu a verze lze dále provést buď pouze dílčí úkol, anebo posouzení geometrické přesnosti stroje ve stavbě a při kontrole geometrické přesnosti.

Hlavními přínosy a novost rozpracované metodiky jsou v:

- synergii výše uvedených přístrojů ve stavbě a kontrole geometrické přesnosti CNC obráběcích celků,
- získání nových informací o aktuálním stavu kvality obráběcího stroje ve fázi stavby a kontroly geometrické přesnosti stroje,

- zavádění korekcí a kompenzací ve fázi stavby stroje a kontroly geometrické přesnosti stroje.

#### **4.3.5 Popis a postup zavedení metodiky**

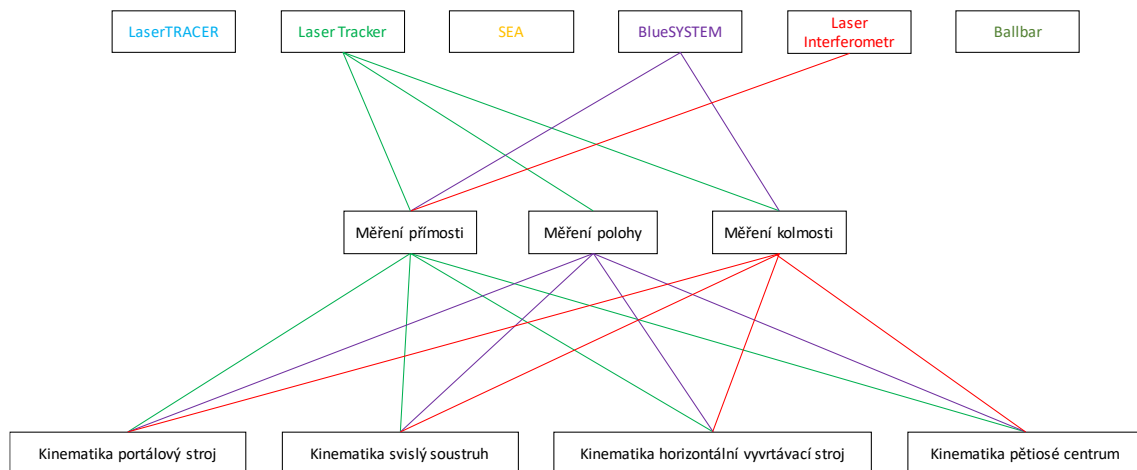
V rámci vývoje metodiky byly testovány měřicí zařízení jak na zkušebních zařízeních, tak na reálných strojích v rámci řešení výzkumného úkolu č. TA04011406 s názvem „Využití progresivních technologií pro efektivní stavbu obráběcích strojů“.

Podrobný popis měřicích zařízení, testování v laboratorních podmínkách a nasazení na reálných strojích byly popsány a předány všem zúčastněným partnerům, kteří se na vývoji metodického postupu podíleli. Jedná se zejména o závěrečné zprávy:

- *Vyzkumna zprava-TA04011406-Z\_14\_009* (za rok 2014) – zpráva obsahuje podrobný popis jednotlivých měřicích zařízení a návrhy na nasazení ve stavbě a kontrole obráběcích strojů.
- *Vyzkumna zprava-TA04011406-Z\_15\_015* (za rok 2015) – zpráva obsahuje výsledky z měření prováděných zejména v laboratorních podmínkách, tak i na dílčích měřeních v provozu.
- *Vyzkumna zprava-TA04011406-Z\_16\_020* (za rok 2016) – zpráva obsahuje dosažené výsledky v nasazení přístrojové techniky z výrobního procesu ve stavbě i kontrole obráběcích strojů.

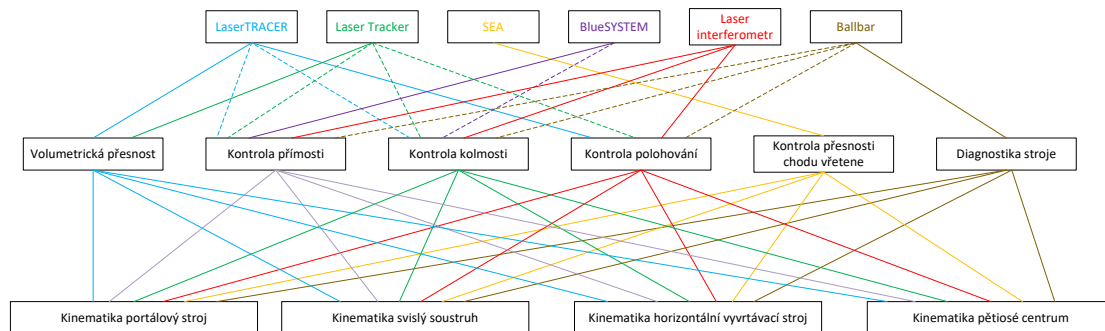
Z výše uvedených výzkumných zpráv je patrný systémový přístup při vývoji, popisu a zavádění metodiky do výrobního procesu stavby a kontroly CNC obráběcích strojů využívající progresivní technologie.

Na schématu obr. 74 jsou zobrazeny navržené postupy pro nasazení a synergií progresivních technologií ve stavbě obráběcích strojů.



obr. 74 Nasazení progresivních technologií ve stavbě obráběcích strojů

V následujícím schématu (obr. 75) jsou zobrazeny navržené postupy pro nasazení a synergií progresivních technologií v kontrole geometrické přesnosti obráběcích strojů.



obr. 75 Nasazení progresivních technologií v kontrole geometrické přesnosti obráběcích strojů

Jako navazující krok je přenos získaných znalostí na výrobce CNC obráběcích strojů formou certifikované metodiky. Dále na firmy, osoby zabývající se údržbou a servisem CNC obráběcích strojů, a nakonec na samotné uživatele těchto strojů.

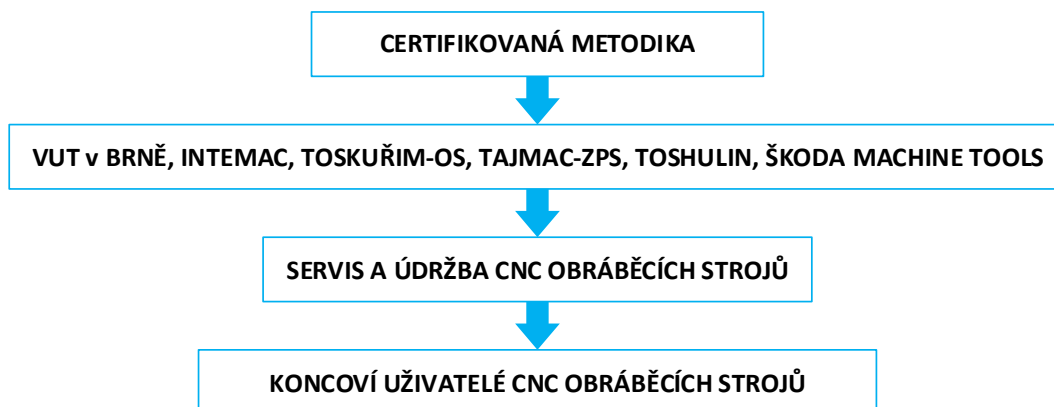
#### 4.3.6 Uživatelé metodiky

Rozpracovaná certifikovaná metodika představuje ucelený soubor postupů pro implementaci přístrojů LaserTRACER, Laser Tracker, BlueSYSTEM, SEA, Laser interferometr, Ballbar v průmyslové praxi.

Výsledky těchto nasazení skládajících se z měření, vyhodnocení, aktivace a kontroly budou vždy průkazné, reprodukovatelné a využitelné pro všechny dotčené zapojené osoby.

Certifikovaná metodika byla navržena primárně pro zavedení progresivních měřících technologií u výrobců obráběcích strojů. Od výrobců strojů bude potom certifikovaná

metodika využita u samotných koncových uživatelů obráběcích strojů a u osob provádějící údržbu a servis těchto strojů (obr. 76).



obr. 76 Schéma přenosu znalostí.

#### 4.3.7 Dílčí závěr

Využití progresivních postupů a technologií představuje velký potenciál v oblasti přesných obráběcích strojů a přesných výrobních procesů. Z doložených měření a výsledků je také patrné, že je možné volumetrické kompenzace využít pro skokové zvýšení geometrické přesnosti stroje, ale také k zajištění dlouhodobé geometrické stability stroje. Volumetrické kompenzace by ale neměly sloužit jako rychlá a „levná“ náhrada za potřebné mechanické seřízení stroje. V tomto aspektu lze spatřovat velké riziko chování odpovědných pracovníků firem vyrábějících CNC obráběcí stroje.

Předložená certifikovaná metodika cílí na systémový přístup zvyšování geometrické přesnosti dosažené ve dvou fázích stavby a oživení stroje. V první fázi se jedná o mechanické seřízení a vyrovnaní stroje s doložitelnou opakovatelností procesu. Druhá fáze je nasazení softwarových kompenzací pro mechanicky seřízený stroj.

#### 4.4 PĚTIOSÉ OBRÁBĚCÍ CENTRUM

*Tato kapitola obsahuje postupy a výsledky uplatněné certifikované metodiky „Metodický postup zavádění volumetrických kompenzací pětiosých obráběcích center s kinematikou BK“ č. 0121/2018/TLO vzniklé v rámci projektu FSI-S-17-4477 „Zvyšování technické vyspělosti výrobních strojů a zařízení“ s autorovým podílem (70 %). Prezentované výsledky vznikly spoluprací autorů Ing. Michal Holub Ph.D., Ing. František Bradáč, Ph.D., doc. Mgr. Jaroslav Hrdina, Ph.D., Ing. Tomáš Marek, Ph.D., Ing. Jan Vetiška, Ph.D., doc. Mgr. Petr Vašík, Ph.D.*



Technologie pětiosého obrábění nabývá postupně na významu, a to zejména s rozvojem letecké dopravy a energetického průmyslu. Typickým zástupcem obrobků jsou lopatky strojních zařízení, na které je kladen stále vyšší důraz z hlediska přesnosti tvaru a rozměru, ale také kvality povrchu. To klade stále vyšší nároky na výrobce pětiosých obráběcích strojů orientovat se do precizního nastavení stroje (z pohledu geometrické přesnosti) a samotných cyklů pro kontrolu stroje ve výrobním procesu. Jednou z metod pro zvyšování geometrické přesnosti, tedy snižování odchylky mezi nástrojem a obrobkem je využití volumetrických kompenzací pro pětiosé kinematiky. V následujících kapitolách je práce zaměřena na zavádění postupů pro kompenzace pětiosých obráběcích center s kinematikou typu BK (obr. 99 Výsledky zkoušky měření volumetrické odchylky – BK4obr. 99, obr. 100, obr. 101).

#### **4.4.1 Cíl metodiky**

Metodika vznikla jako součást výzkumného úkolu vedeným pod číslem č. FSI-S-17-4477 a názvem „Zvyšování technické vyspělosti výrobních strojů a zařízení“, který je realizován za finanční podpory Specifického výzkumu 2017 pod Fakultou strojního inženýrství, Vysokého učení technického v Brně.

Předkládaná metodika popisuje inovativní způsob nasazení trackovacích laserových interferometrů s cílem zvýšení jejich volumetrické přesnosti.

Metodika přináší nové poznatky a možnosti zlepšení procesů v oblasti kontroly geometrické přesnosti obráběcích strojů. Využitím získaných znalostí a zavedením volumetrických kompenzací je docíleno zvýšení jejich pracovní přesnosti.

Nedílnou součástí navrhovaného řešení je rovněž zajištění efektivní práce s informacemi získanými kontrolou volumetrické přesnosti obráběcích strojů. V současné době u výrobců strojů nejsou dostatečně zavedené postupy pro zavádění volumetrických kompenzací pětiosých obráběcích strojů a s tím spojené zpracování dat. V takovémto případě nelze efektivně pracovat z naměřenými a vyhodnocenými informacemi. Nasazením navržené metodiky je předpoklad odstranění tohoto nedostatku a získané informace bude možné využít při následných inovacích v procesu zvyšování volumetrické přesnosti tříosých a pětiosých obráběcích center.

#### **4.4.2 Popis současného stavu**

Neustálý vývoj měřicí techniky představuje možný potenciál pro jejich uživatele inovovat vlastní produkty a zavádět je do výrobního procesu u jejich zákazníků. Zvyšování výrobní přesnosti obráběcích strojů a zajištění způsobilosti výroby při stále se zvyšujících požadavcích na geometrickou a rozměrovou přesnost obrobků vede k požadavkům získávat více informací a kvalitnějších informací o sledovaném stroji a výrobním procesu.

Využití měřicích zařízení jako LaserTRACER, Laser interferometr XL-80 a XR20-w, Ballbar TRACE a další podobné zařízení představuje vysoký potenciál dosáhnout zvýšení v první řadě pracovní přesnosti a následné udržení její dlouhodobé stability.

V oblasti zvyšování volumetrické přesnosti pěti osých obráběcích stroje neexistuje ucelená metodika, která by:

- popisovala nasazení přístrojů LaserTRACER, Laser interferometr, Ballbar do oblasti zavádění volumetrických kompenzací pětiosých CNC obráběcích center,
- stanovila jednoznačný postup a pravidla, která je třeba dodržet pro úspěšné řešení problematiky zavádění volumetrických kompenzací pětiosých CNC obráběcích center,
- stanovila počáteční podmínky pro možnou implementaci volumetrických kompenzací pětiosých CNC obráběcích center,
- definovala ucelené postupy pro správnou implementaci volumetrických kompenzací pětiosých CNC obráběcích center.

Metodika vyvíjená v rámci tohoto projektu měla za cíl odstranit výše uvedené nedostatky. Rovněž lze konstatovat, že v době řešení u výrobců a uživatelů pětiosých obráběcích center neexistovala metodika, která by popisovala ucelené postupy měření pro nasazení volumetrických kompenzací.

#### **4.4.3 Volumetrická přesnost pětiosých obráběcích center**

Volumetrická přesnost pětiosých obráběcích center popisuje stav aktuální geometrie v definovaném pracovním prostoru. Posouzení volumetrické přesnosti je možné provést dvěma způsoby, a to přímým nebo nepřímým způsobem měření.

Nepřímý způsob hodnocení volumetrické přesnosti stroje je posuzován podle obrobeneho zkušební kusu nebo série zkušebních kusů, které mají v prostoru jasně definovaný tvar a dále posouzení pracovního postupu obrábění. Z takto provedené kontroly lze usoudit, zda je stroj v dobré nebo špatné kondici, popřípadě provést odhad, v jakém z pracovních uzlů stroje vznikají chyby. Tato zkouška posuzuje odchylky pouze v prostoru, kde je umístěn obrobek.

Přímý způsob posouzení volumetrické přesnosti spočívá v nasazení měřicího zařízení, pomocí kterého jsou identifikovány geometrické odchylky obráběcího stroje. Podstatnou výhodou tohoto přístupu je, že lze využít získané informace pro výpočet korekčních hodnot, které je možno zanášet přímo do řídicího systému CNC obráběcího stroje. Zpravidla se jedná o měření a posouzení jedné geometrické odchylky (např. polohy, přímosti, kolmosti atd.). Po proměření této geometrické odchylky následuje její zanesení ve formě korekcí do stroje. Potom následuje úprava strategie měření a posouzení další geometrické odchylky. Tento postup se opakuje za využití různých měřicích zařízení až do dosažení přijatelné geometrie stroje a tím získání informace o volumetrické přesnosti.

Nevýhodou výše uvedeného postupu je jeho časová náročnost. U malého CNC obráběcího stroje s tříosou kinematikou může tento proces trvat, v závislosti na počtu posuzovaných odchylek, až 5 pracovních dní. Pro tříosý CNC obráběcí stroj je možné popsat, jak bylo řečeno 21 geometrických odchylek a u horizontálních vyvrtávacích strojů až 23. U pětiosých obráběcích strojů je to potom až 43 geometrických odchylek, které popisují výslednou volumetrickou přesnost stroje.

V rámci návrhu metodického postupu zavádění volumetrických kompenzací pro pětiosé obráběcí stroje byly do procesu měření a zpracování dat nasazeny přístroje: LaserTRACER, Laser interferometr XL-80 a XR20-w a Ballbar QC20-w TRACE.

Návrh metodického postupu reaguje na dostupnost výše uvedených měřicích zařízení, které je možné pro zavádění volumetrických kompenzací a zvyšování výrobní přesnosti pětiosých obráběcích center využít. Metodický postup je rovněž použitelný pro stroje s méně řízenými osami, tedy 4osé a 3osé CNC obráběcí stroje.

#### **4.4.4 Verifikace volumetrické přesnosti pětiosých obráběcích center**

Po zavedení příslušných korekcí je nezbytné verifikovat jejich aplikaci na stroji. Tato verifikace může být opět provedena přímou nebo přímou metodou. Na obr. 77 jsou prezentovány postupy a požadavky na posouzení vybraných vlastností obráběcích strojů.



obr. 77 Požadavky na postupy k získání vlastností obráběcích strojů [15]

#### 4.4.5 Charakteristika novosti postupu metodiky

Zásadní přínos a inovativní prvek rozpracované metodiky spočívá ve vzájemném provázání dílčích poznatků a funkcionalit do jednoho celku „**měřicí technologie – pětiosé obráběcí centrum**“. Je třeba konstatovat, že některá uvedená řešení jsou v obecném měřítku známá a je snaha tyto obecné znalosti využívat. Nicméně právě jejich společná integrace a přímá aplikace v oblasti nasazení volumetrické kompenzace a zvyšování volumetrické přesnosti pětiosých obráběcích center představuje žádanou novost a inovaci, která v této oblasti není doposud uceleně používána.

Nově navržený metodický postup cílí na správné nasazení měřicích zařízení a vyhodnocení získaných dat tak, že dojde ke zvýšení volumetrické přesnosti pětiosých obráběcích center formou zavádění softwarových korekcí do řídicího systému stroje.

Novost lze spatřovat i v tom, že navržený postup je možné s drobnými úpravami uplatnit na libovolnou kinematickou strukturu frézovacího obráběcího centra, které ale musí být osazeno řídicím systémem s aktivní opcí pro volumetrické kompenzace. Podle typu a verze řídicího systému lze dále provést například buď tříosou anebo víceosou volumetrickou kompenzaci.

Hlavními přínosy a novost v rozpracované metodiky jsou:

- metodický přístup nasazení výše uvedených přístrojů při zavádění volumetrických kompenzací pro pětiosá obráběcí centra,
- získání nových informací o aktuálním stavu kvality obráběcího centra.

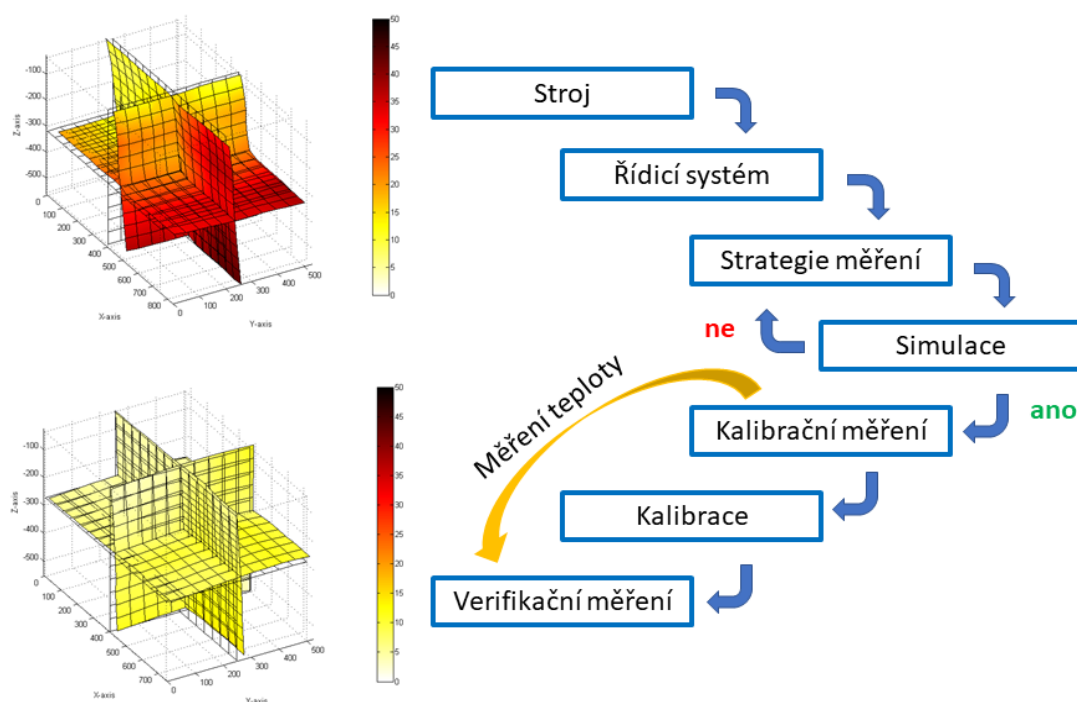
#### 4.4.6 Popis a postup zavedení metodiky

V rámci vývoje metodiky zavádění volumetrických kompenzací byly provedeny příslušné laboratorní zkoušky, které byly publikovány jak ve výzkumných zprávách, tak na odborných konferencích nebo ve vědeckých periodikách.

Podrobný popis jednotlivých měřicích zařízení je popsán v úvodní kapitole předloženého dokumentu (2.2 Zařízení pro měření volumetrické přesnosti).

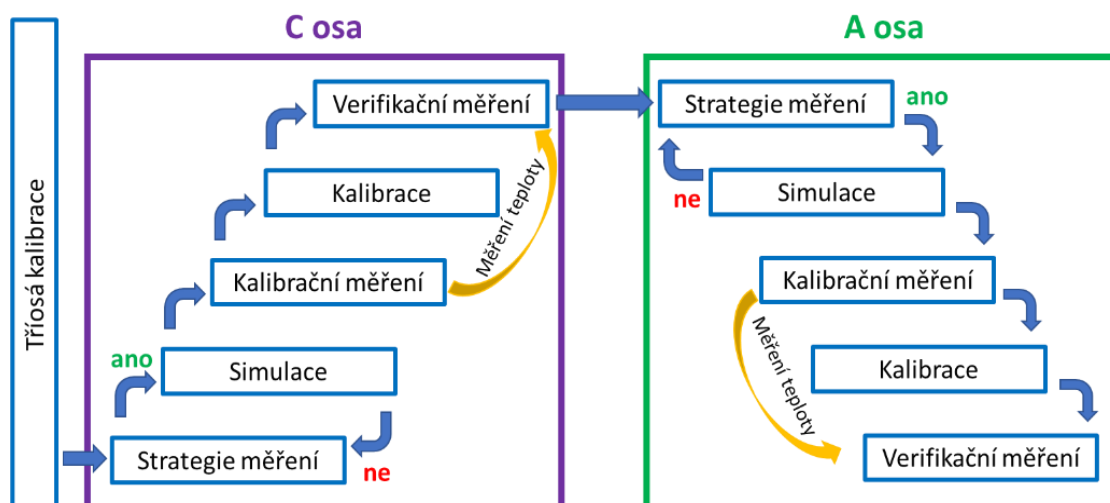
Z výše uvedených výzkumných zpráv je patrný systémový přístup při vývoji, popisu a zavádění metodiky do výrobního procesu stavby a kontroly CNC obráběcích strojů využívající progresivní technologie (2.2).

V následujícím schématu (obr. 78) jsou zobrazeny navržené postupy pro nasazení výše uvedených měřicích přístrojů pro zavádění volumetrických kompenzací pro pětiosá obráběcí centra.



obr. 78 Navržený postup měření pro tříosé kinematické struktury CNC obráběcích strojů

V následujícím schématu (obr. 79) jsou zobrazeny navržené postupy pro zavádění volumetrických kompenzací pro víceosé obráběcí stroje. Schéma je aplikováno na kinematice pětiosých strojů „BK“ (obr. 100, obr. 101).



obr. 79 Nasazení vybraných měřicích zařízení při zavádění volumetrických kompenzací pro víceosá obráběcí centra

Jako navazující krok je přenos získaných znalostí na výrobce CNC obráběcích strojů formou certifikované metodiky. Dále na firmy, osoby zabývající se údržbou a servisem CNC obráběcích strojů, a nakonec na samotné uživatele těchto strojů.

#### 4.4.7 Uživatelé navržené metodiky

Do procesu zvyšování volumetrické přesnosti je zpravidla zapotřebí zapojit více specialistů jako jsou například metrolog, PLC programátor, programátor řídicího systému, kontrolor, montér. Doposud však nejsou popsány postupy (4.3.6) integrující zapojení specialistů do jednotlivých procesů zavádění volumetrických kompenzací pětiosých obráběcích center. Přenos znalostí navržené metodiky pro kompenzace volumetrické přesnosti pětiosých obráběcích center bude probíhat v rámci výuky „Testování obráběcích strojů“ na VUT v Brně a znalosti budou přenášeny na studenty primárně pátého ročníku. Dále budou znalosti paralelně přenášeny na výrobce a dodavatele CNC obráběcích strojů. Po zavedení u výrobců a dodavatelů potom dále na servis a údržbu CNC obráběcích strojů. V neposlední řadě na jejich koncové uživatele.

#### 4.4.8 Případová studie – ověření metodického přístupu na stroji DMG MORI, DMU 75 monoblock

Případová studie byla realizována na pětiosém obráběcím stroji DMU 75 monoBlock, DMG MORI s kinematickou strukturou WCABaseYXZT (Kinematika „BK“). Řídicí systém stroje je HEIDENHAIN TNC 640 s aktivovanou opcí 52 (KinematischKomp).

Jedná se o stroj z produkce DMG MORI určený pro kontinuální pětiosé obrábění. Koncepce stroje je postavena na tříosé kinematice nástroje (X, Y, Z) a otočně sklopném stole v obrobku. Rám stroje je z jednoho odlitku (tzv. Monoblok) a ustaven na třech nosných bodech. Řada 75 odpovídá velikosti pojezdu 750 mm v ose X a je druhou nejmenší řadou tohoto typu stroje. Velikostní řady DMU mají následující rozdělení 65, 75, 85, 105 a 125. Navržená metodika je vhodná pro kompletní řadu DMU (obr. 80).



obr. 80 DMU 75 monoBlock, DMG MORI [75]

V tab. 11 jsou zobrazeny základní technické parametry stroje DMU 75 monoBlock.

tab. 11 Technické parametry stroje DMU 75 monoBlock. [75]

Rozjezd os [mm]	750/650/560
Velikost stolu [mm]	Pr. 650
Maximum zatížení [kg]	600
Maximální rozměry obrobku [mm]	Pr. 840x500
Maximální posuvová rychlost X/ Y/ Z [m/min]	40/40/40
Maximální otáčky vřetene [rpm]	20000
Řídicí systém	Heidenhain TNC 640

#### A. Kalibrační a verifikační měření v osách x, y a z

V prvním kroku byla dle technické dokumentace stroje provedena kontrola a kompenzace všech řízených os dle normy VDI/DGQ 3441:1977 s následujícími výsledky.

tab. 12 Výsledky chyb polohování dle VDI/DGQ 3441 [75]

<i>Osa</i>	<i>Chyba polohování – P</i>
X	3,621 $\mu\text{m}$
Y	2,591 $\mu\text{m}$
Z	4,533 $\mu\text{m}$
A	2,6 arcsec
C	3,0 arcsec

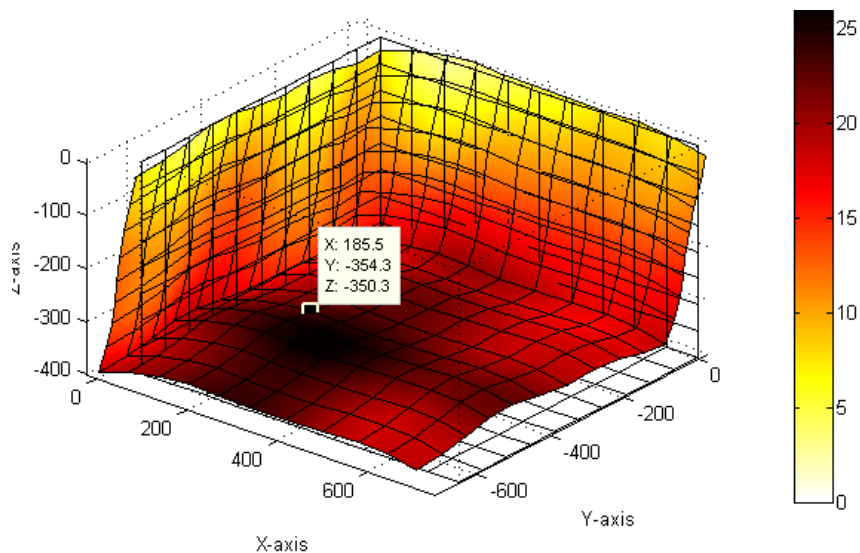
Ve druhém kroku bylo provedeno kalibrační a verifikační měření ve třech strojních osách x, y a z přístrojem LaserTRACER (obr. 81).



obr. 81 Ukázka měření tříosé kinematiky XYZ pomocí LaserTRACERU

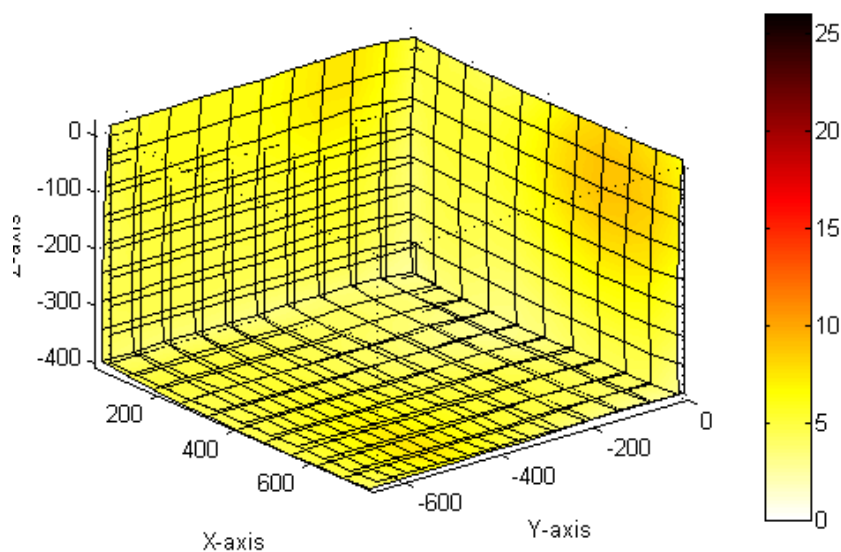
Na obr. 82 je znázorněn výsledek kalibračního měření s maximální volumetrickou odchylkou 26  $\mu\text{m}$ .





obr. 82 Vyhodnocení tříosé volumetrické přesnosti stroje DMU 75 – kalibrace

Na obr. 83 je znázorněn výsledek verifikačního měření s maximální volumetrickou odchylkou 8  $\mu\text{m}$ . Volumetrickou kompenzací tříosé kinematiky došlo k redukci volumetrické chyby až o 70 %.

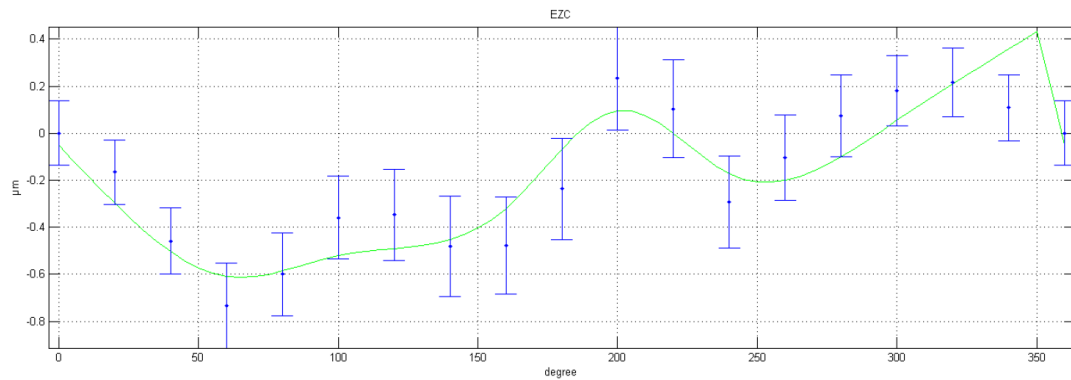


obr. 83 Vyhodnocení tříosé volumetrické přesnosti stroje DMU 75 – verifikace

### B. Kalibrační a verifikační měření C osy

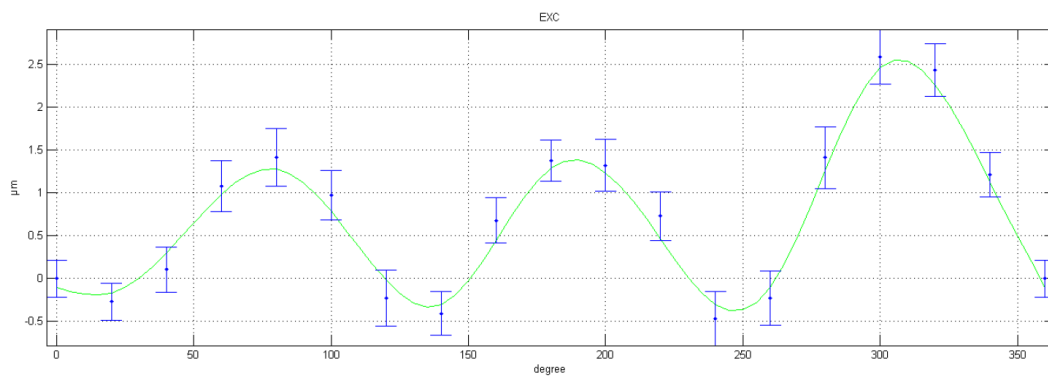
Na následujících obrázcích jsou zobrazeny kalibrační měření C-osy. Verifikační měření nebylo v tomto případě realizováno z důvodu chyby řídicího systému stroje Heidenhain TNC 640, která byla v rámci zkoušek nalezena a konzultována přímo

s výrobcem řídicího systému. Tuto chybu nebylo možné pro danou verzi řídicího systému opravit. Na obr. 84 je znázorněn průběh chyby  $E_{ZC}$  v celém rozsahu otáčení.



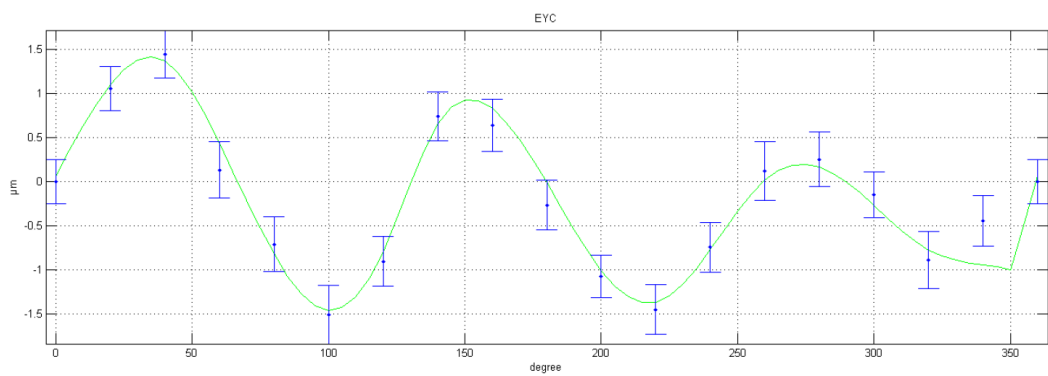
obr. 84 Vyhodnocení chyby  $E_{ZC}$

obr. 85 prezentuje chybu posunu osy rotace  $C$  ve směru osy  $X$ .



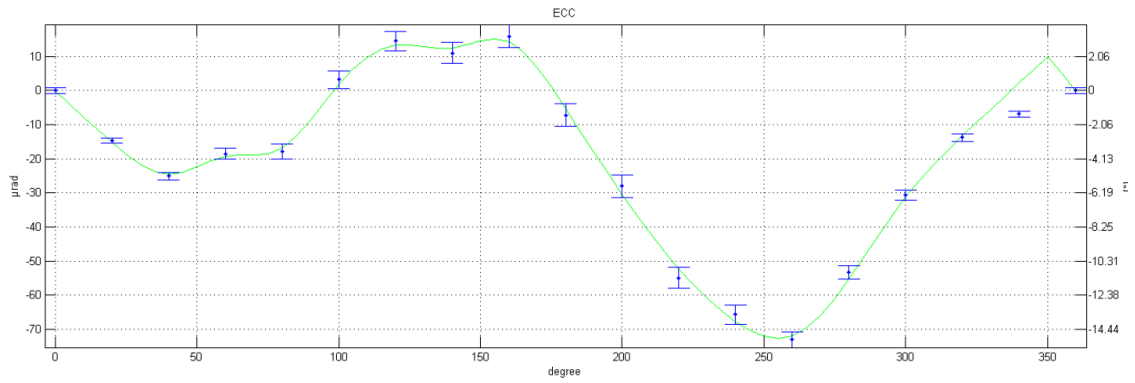
obr. 85 Vyhodnocení chyby  $E_{XC}$

obr. 86 prezentuje chybu posunu osy rotace  $C$  ve směru osy  $Y$ .



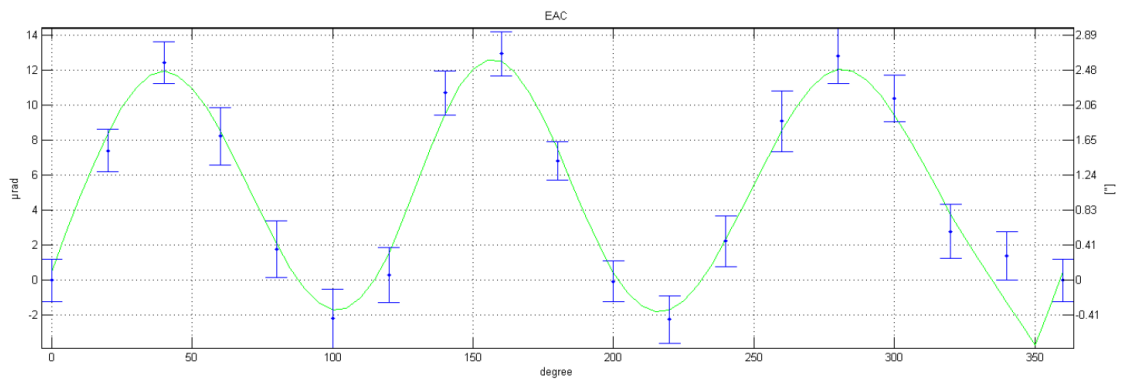
obr. 86 Vyhodnocení chyby  $E_{YC}$

obr. 87 prezentuje chybu přesnosti najetí do polohy osy  $C$ .



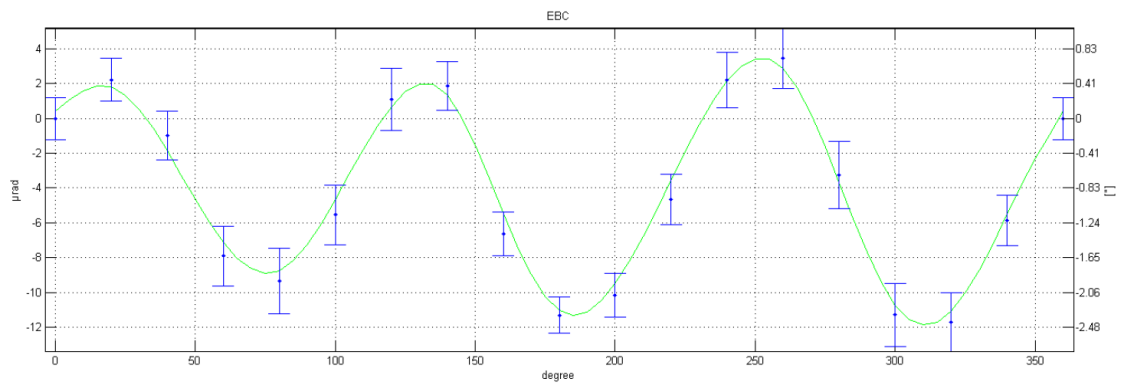
obr. 87 Vyhodnocení chyby Ecc

obr. 88obr. 87 prezentuje úhlovou chybu osy C okolo osy X.



obr. 88 Vyhodnocení chyby EAc

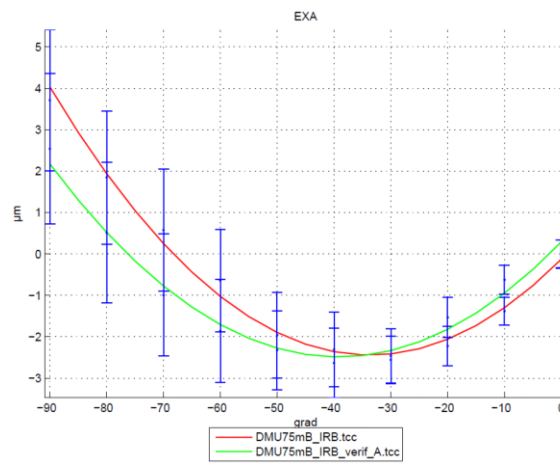
obr. 89obr. 87 prezentuje úhlovou chybu osy C okolo osy Y.



obr. 89 Vyhodnocení chyby EBC

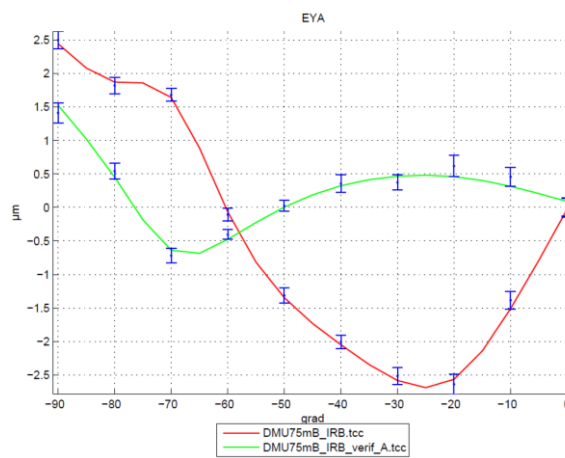
### C. Kalibrační a verifikační měření A osy

Na následujících obrázcích jsou znázorněny průběhy chyb rotační osy A pro kalibrační a verifikační měření. Na obr. 90 je znázorněn průběh chyby  $E_{XA}$ .



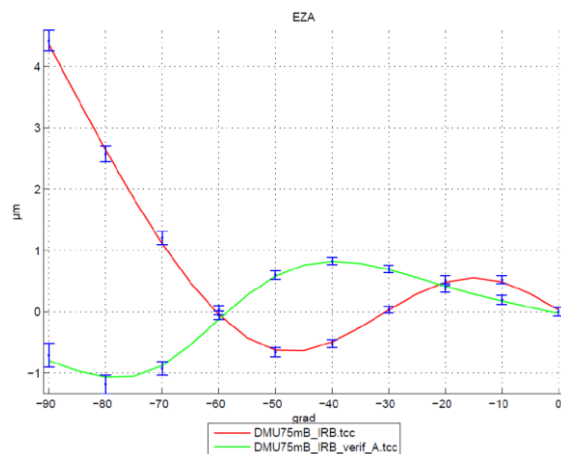
obr. 90 Vyhodnocení chyby  $E_{XA}$

obr. 91 zobrazuje průběh posunutí osy A ve směru osy Y.



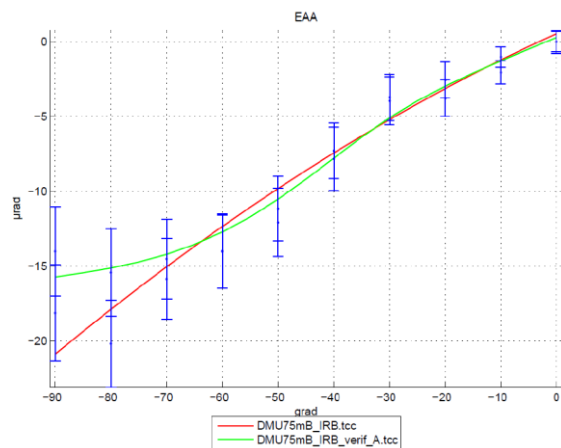
obr. 91 Vyhodnocení chyby  $E_{YA}$

obr. 92 zobrazuje průběh posunutí osy X(A) ve směru osy Z.



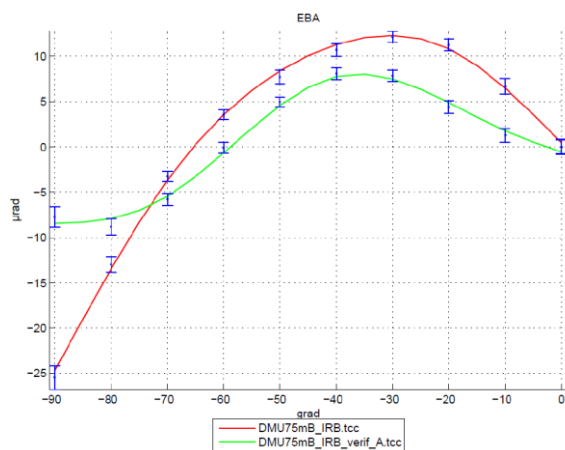
obr. 92 Vyhodnocení chyby EZA

obr. 93 zobrazuje průběh chyby najetí do polohy osy A.



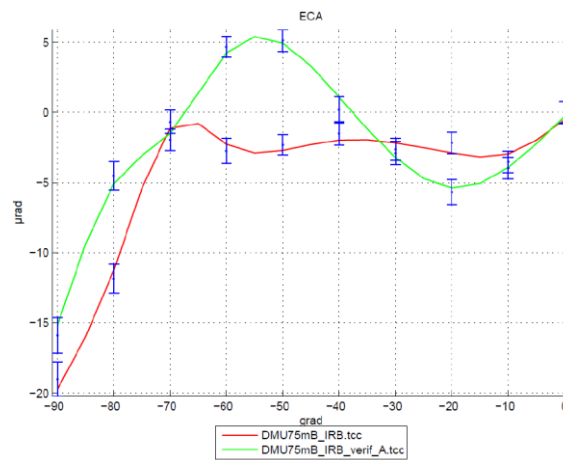
obr. 93 Vyhodnocení chyby EAA

obr. 94 zobrazuje průběh úhlové chyby osy Y okolo osy X(A).



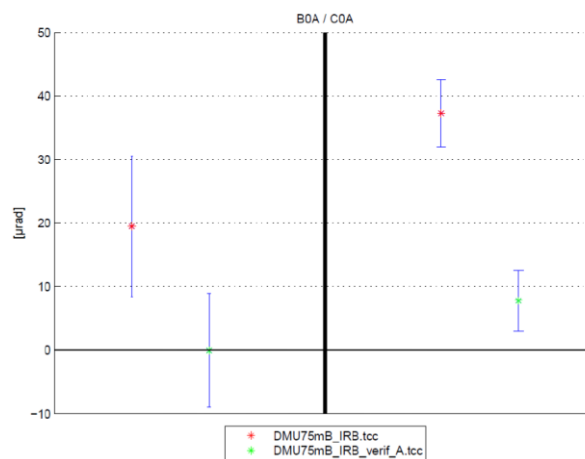
obr. 94 Vyhodnocení chyby EBA

obr. 95 zobrazuje průběh úhlové chyby osy Z okolo osy X(A).



obr. 95 Vyhodnocení chyby  $E_{CA}$

obr. 96 zobrazuje velikost chyb kolmostí  $E_{B0A}$  a  $E_{C0A}$ .

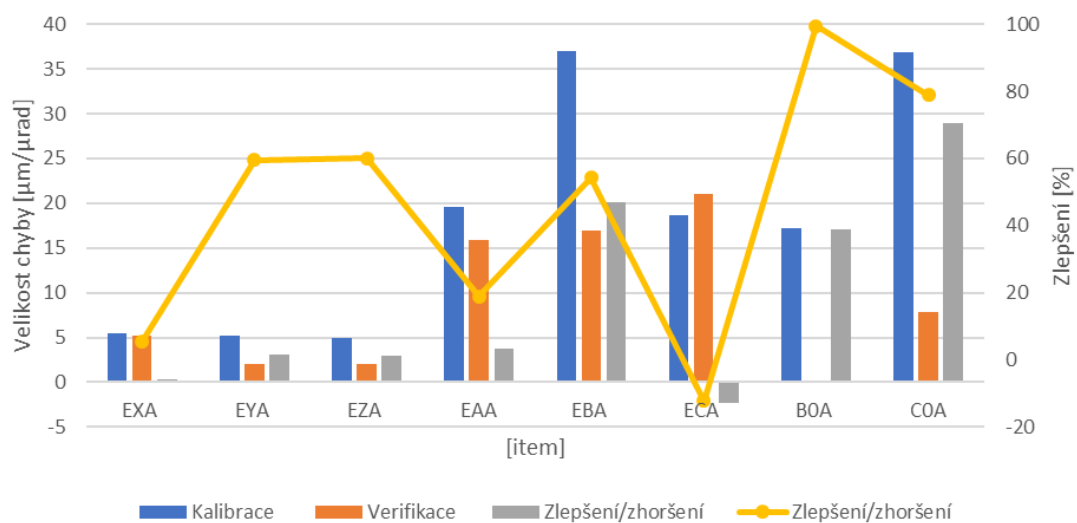


obr. 96 Vyhodnocení chyb kolmosti  $E_{B0A}$ ,  $E_{C0A}$

tab. 13 Srovnání výsledků kalibračního a verifikačního měření A osy

	Kalibrace	$U_{(max)}$	Verifikace	$U_{(max)}$	Zlepšení/zhoršení [ $\mu\text{m}/\mu\text{rad}$ ]	Zlepšení/zhoršení [%]
$E_{XA}$ [ $\mu\text{m}$ ]	5,5	0,9	5,2	1,6	0,3	5,5
$E_{YA}$ [ $\mu\text{m}$ ]	5,2	0,1	2,1	0,1	3,1	59,6
$E_{ZA}$ [ $\mu\text{m}$ ]	5,0	0,2	2,0	0,2	3,0	60,0
$E_{AA}$ [ $\mu\text{rad}$ ]	19,6	3,1	15,9	3,9	3,7	18,9
$E_{BA}$ [ $\mu\text{rad}$ ]	37,0	1,0	16,9	1,1	20,1	54,3
$E_{CA}$ [ $\mu\text{rad}$ ]	18,7	0,9	21,0	1,1	-2,3	-12,3
$E_{B0A}$ [ $\mu\text{rad}$ ]	17,2	8,4	-0,1	10,9	17,1	99,4
$E_{C0A}$ [ $\mu\text{rad}$ ]	36,8	5,1	7,8	3,8	29,0	78,8

V grafu zobrazeném na obr. 97 jsou patrné výsledky při aktivaci volumetrických kompenzací u rotačních os. Na grafu jsou výsledky platné pro rotační osu A.



obr. 97 Srovnání výsledků kalibračního a verifikačního měření osy A

#### D. Verifikační měření pětiosé kinematiky

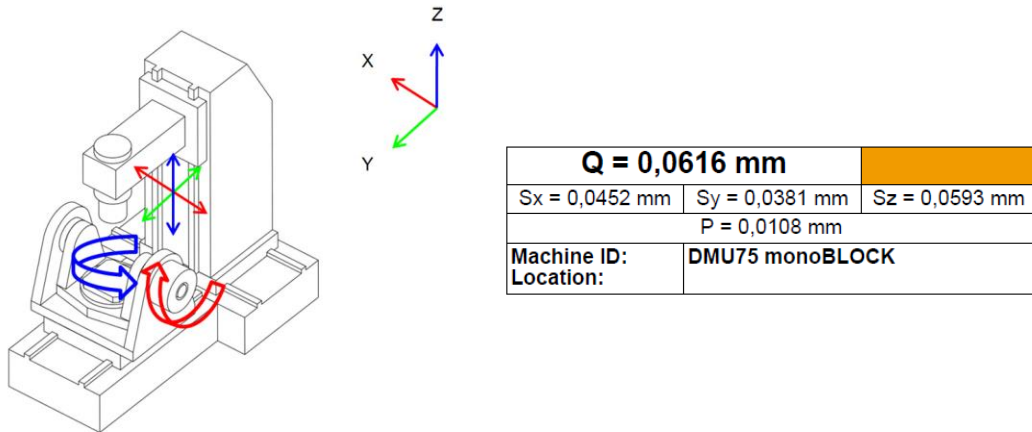
Po aktivovaných kompenzací pro osy X, Y, Z a A je provedeno měření volumetrické odchylky měřicím přístrojem Rotary analyzer.

Na obr. 98 je zobrazeno měření stroje DMU 75 v konfiguraci BK2 (test osy C) a BK4 (volumetrický test).



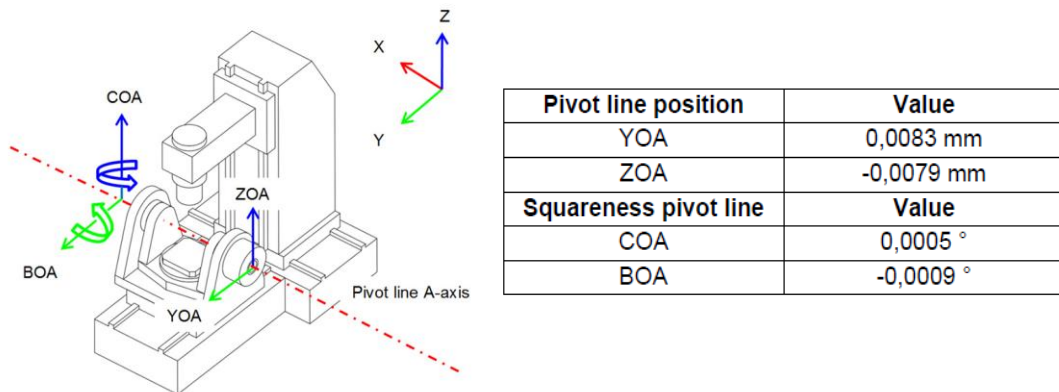
obr. 98 Měření pětiosé kinematiky přístrojem Rotary analyzer

Zkouška kinematiky stroje byla provedena dle normy ISO 10791-6: 2014. Podmínky zkoušek pro obráběcí centra – Část 6: Přesnost posuvů, frekvence otáčení a interpolací. Výsledky testu BK4 volumetrické měření je zobrazeno na obr. 99. Celková hodnota popisující volumetrickou odchylku při pětiosém kontinuálním pohybu je rovna 61,6  $\mu\text{m}$ .



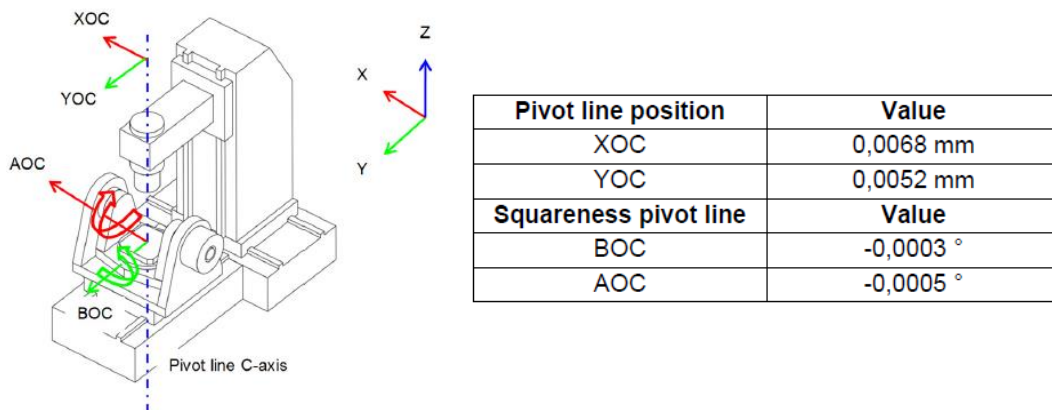
obr. 99 Výsledky zkoušky měření volumetrické odchylky – BK4

Na obr. 100 a obr. 101 jsou zobrazeny výsledky polohy osy rotace  $E_{YOA}$ ,  $E_{ZOA}$  a  $E_{XOC}$  a  $E_{YOC}$ .



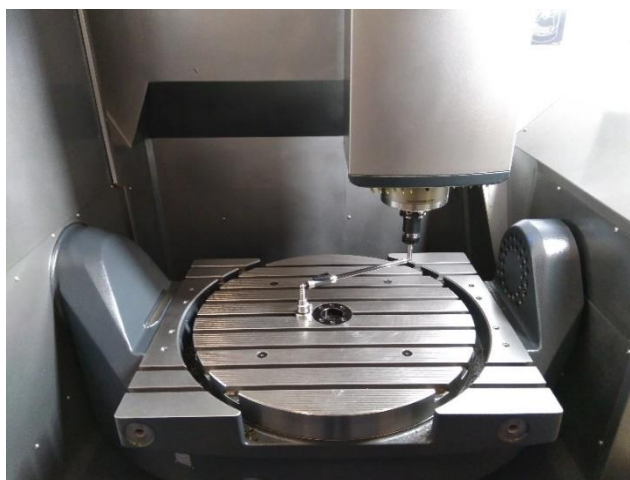
obr. 100 Výsledky zkoušky osy A – BK1





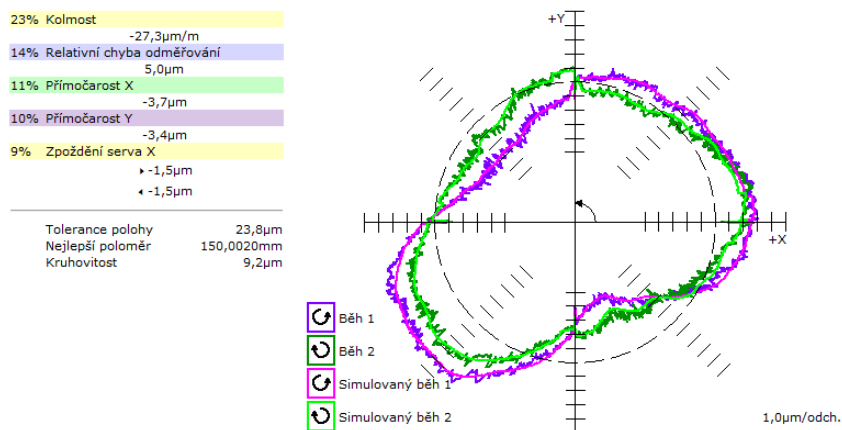
obr. 101 Výsledky zkoušky osy C – BK2

Kromě již zmíněných je dalším způsobem verifikace volumetrických kompenzací ověření zkouškou kruhové interpolace dvou lineárních os. Poloha Ballbaru byla volena shodná pro kalibrační i verifikační měření. Byl nastaven poloměr kružnice 150 mm, což odpovídá maximálnímu průměru, který lze v pracovním prostoru stroje v rovině XY realizovat. Pracovní posuv byl zvolen 2000 mm/min. Na obr. 102 je ukázka z pracovního prostoru stroje při zkoušce kruhové interpolace dle ISO 230-4:2005.



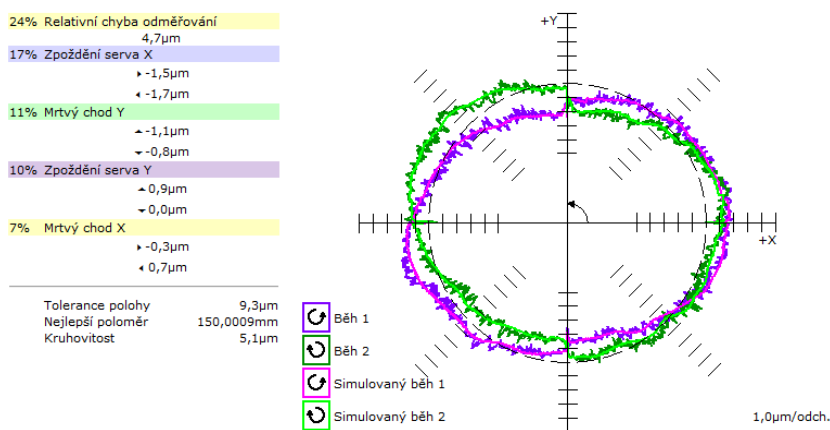
obr. 102 Schéma měření Ballbarem QC20-w, rovina XY

Na obr. 103 je znázorněn výsledek zkoušky pro kalibrační měření v rovině XY. Z výsledku je zřejmé, že chybou s největším podílem na výsledné chybě kruhovitosti byla diagnostikována kolmost, další chybou relativní chyba odměřování a následně chyby přímosti os X a Y.



obr. 103 Měření chyby kruhovitosti v rovině XY – kalibrace

Na obr. 104 je znázorněn výsledek verifikačního měření zkoušky kruhové interpolace. Z výsledků je patrné, že došlo ke změně tvaru kružnice i hodnotě kruhovitosti, která byla snížena ze 9,2  $\mu\text{m}$  na 5,1  $\mu\text{m}$ . Dále je možné pozorovat, že geometrické chyby jako kolmost a přímočarost se již nevyskytují mezi pěti nevýznamnějšími chybami stroje.



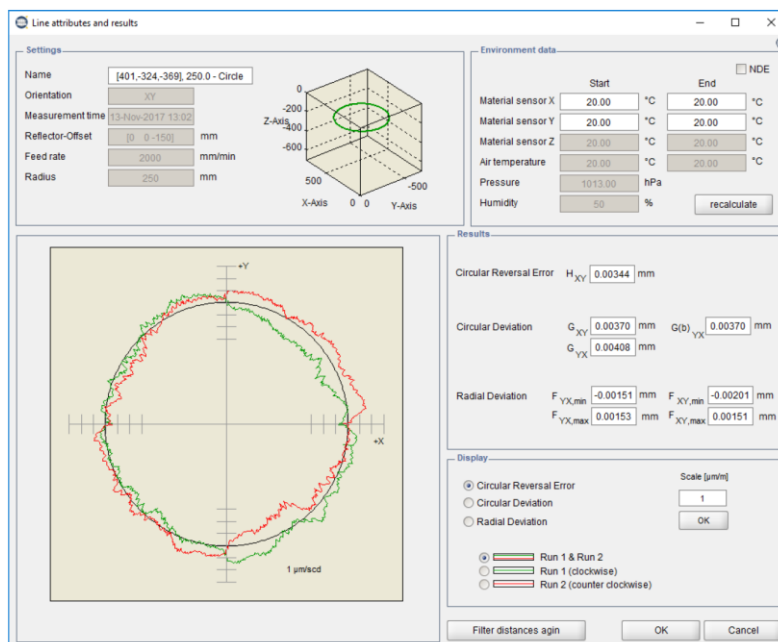
obr. 104 Měření chyby kruhovitosti v rovině XY – verifikace

Na obr. 105 je znázorněno verifikační měření zkoušky kruhové interpolace měřicím zařízením LaserTRACER. Podmínky zkoušky byly uzpůsobeny LaserTRACER, přičemž poloměr byl 250 mm (jedná se o spodní limit zařízení) a posuvová rychlost zůstala 2000 mm/min. Měření bylo realizováno ve středu osy rotace C.



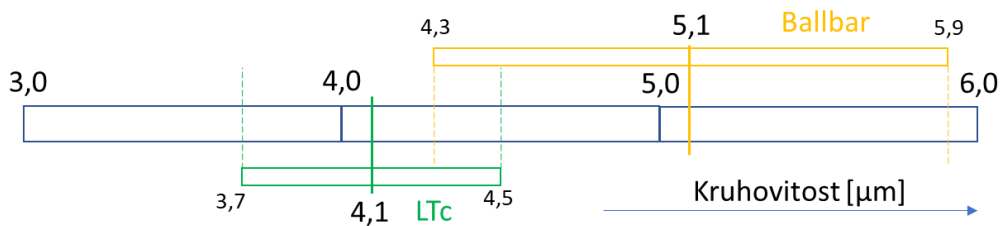
obr. 105 Verifikační měření zkouškou kruhovitosti přístrojem LaserTRACER

Na obr. 106 je znázorněn výsledek měření dle ISO 230-4:2005.



obr. 106 Vyhodnocení kruhovitosti přístrojem LaserTRACER dle ISO 230-4:2005

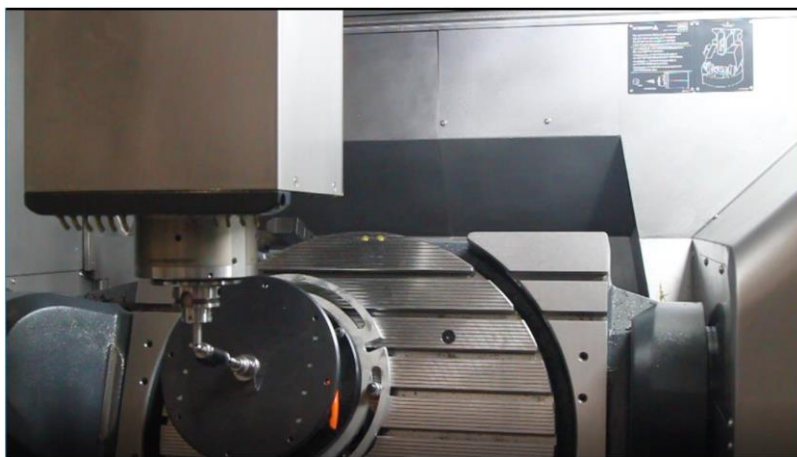
Chyba kruhovitosti je v tomto případě rovna 4,1  $\mu\text{m}$  s odhadem nejistoty měření 0,4  $\mu\text{m}$ . U měření kruhové interpolace přístrojem Ballbar byla naměřena hodnota kruhovitosti 5,1  $\mu\text{m}$  s odhadem nejistoty měření 0,8  $\mu\text{m}$ . Na obr. 107 je zobrazena interpretace naměřených výsledků, kde je patrný překryv hodnot v rozmezí 0,2  $\mu\text{m}$ . Měření lze považovat za shodná.



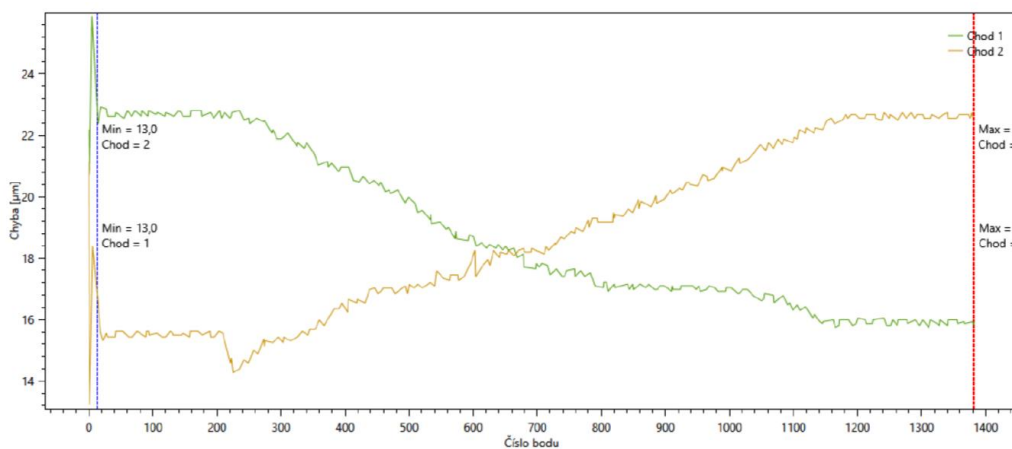
obr. 107 Grafická interpretace výsledků zkoušky kruhové interpolace Ballbar a LaserTARCER

### E. BallbarTRACE

Na obr. 108 lze vidět ukázkou z měření na stroji a na obr. 109 výslednou chybu  $E_{XA}$  měřenou technologií Ballbar TRACE, kde výsledná chyba dosahuje hodnoty  $8,7 \mu\text{m}$ . Měření bylo provedeno bez aktivovaných kompenzací KinComp.

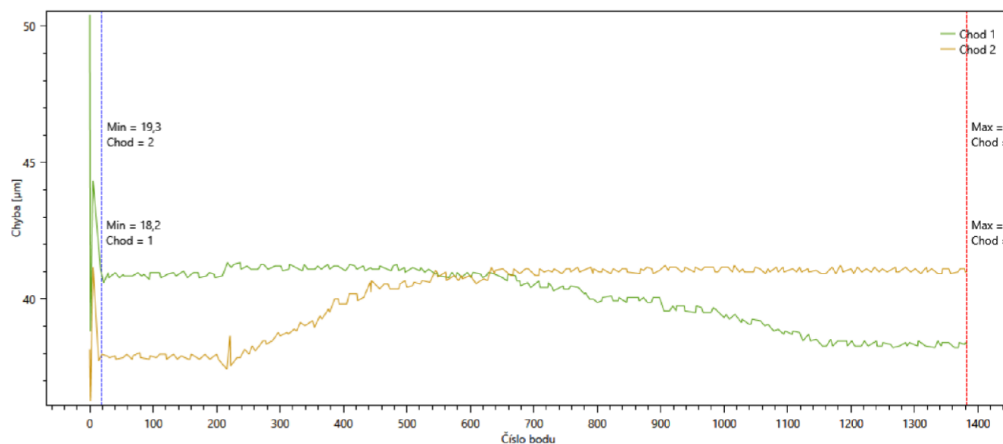


obr. 108 Zkouška BallbarTRACE – chyba  $E_{XA}$



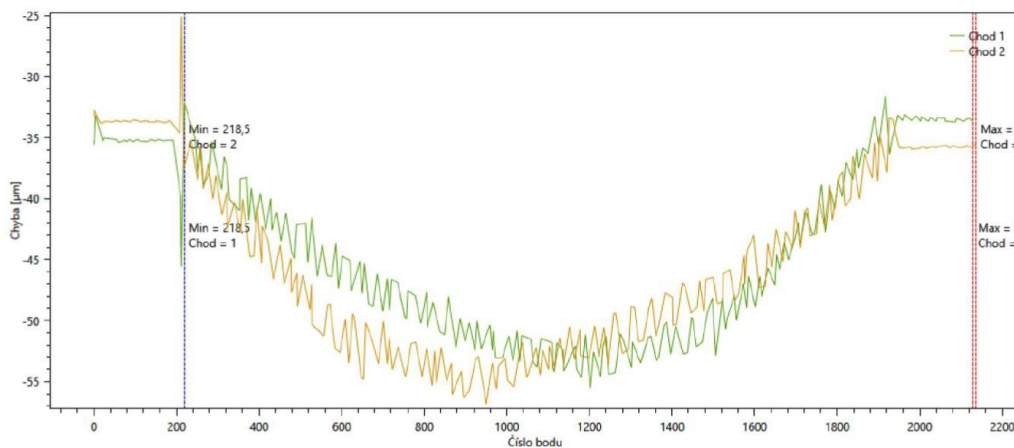
obr. 109 Vyhodnocení chyby  $E_{XA}$

Na obr. 110 lze vidět výslednou chybu  $E_{XA}$  měřenou technologií Ballbar TRACE, kde výsledná chyba dosahuje hodnoty  $3,9 \mu\text{m}$ . Měření bylo provedeno s aktivovanými kompenzacemi KinComp.



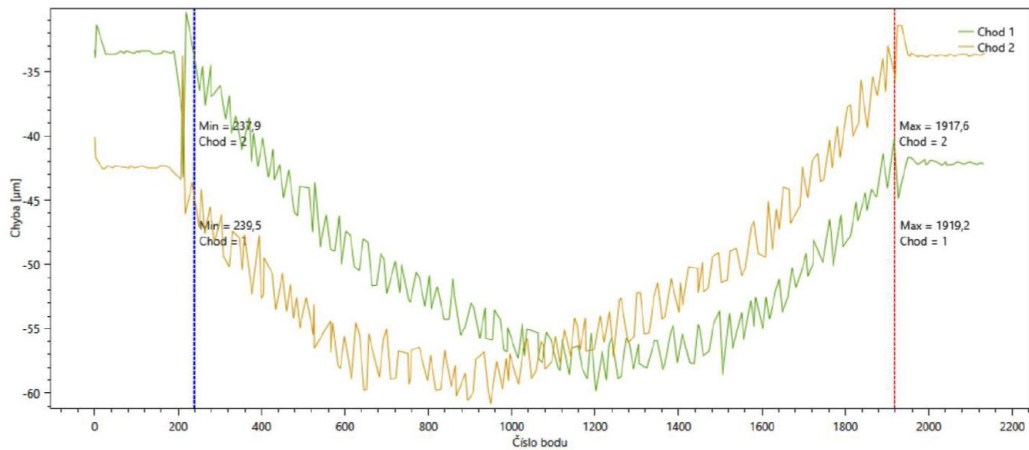
obr. 110 Vyhodnocení chyby  $E_{XA}$

obr. 111 prezentuje výslednou chybu  $E_{YA}$  měřenou technologií Ballbar TRACE, kde výsledná chyba dosahuje hodnoty  $25,3 \mu\text{m}$ . Měření bylo provedeno bez aktivovaných kompenzací KinComp.



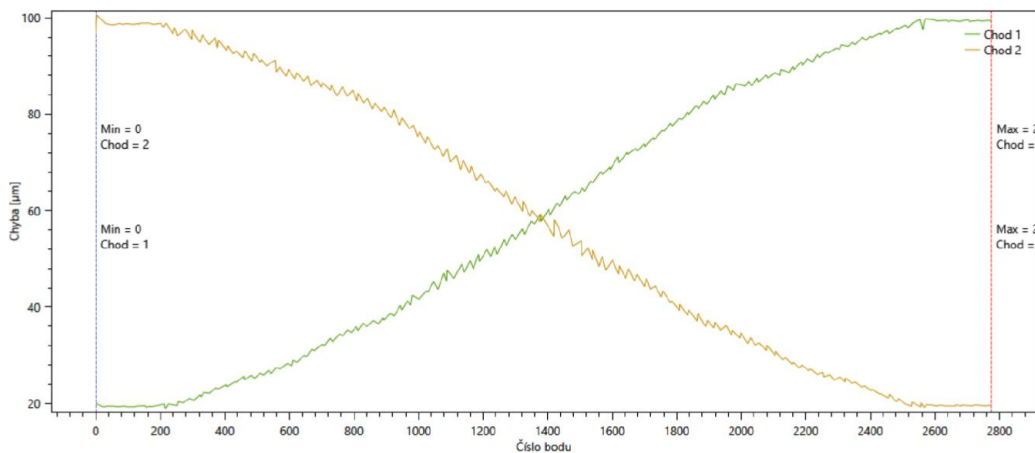
obr. 111 Vyhodnocení chyby  $E_{YA}$

Na obr. 112 lze vidět výslednou chybu  $E_{YA}$  měřenou technologií Ballbar TRACE, kde výsledná chyba dosahuje hodnoty  $28,7 \mu\text{m}$ . Měření bylo provedeno s aktivovanými kompenzacemi KinComp.



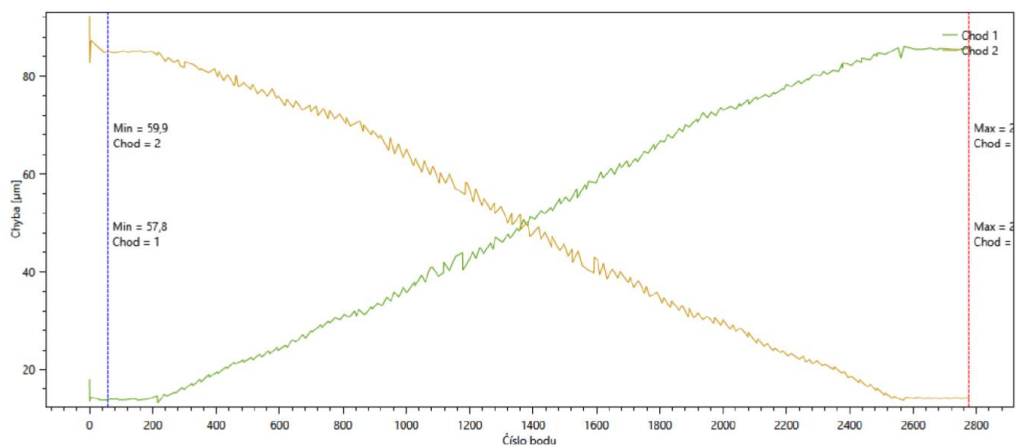
obr. 112 Vyhodnocení chyby  $E_{YA}$

obr. 113 ukazuje výslednou chybu  $E_{ZA}$  měřenou technologií Ballbar TRACE, kde výsledná chyba dosahuje hodnoty 81,6  $\mu\text{m}$ . Měření bylo provedeno bez aktivovaných kompenzací KinComp.



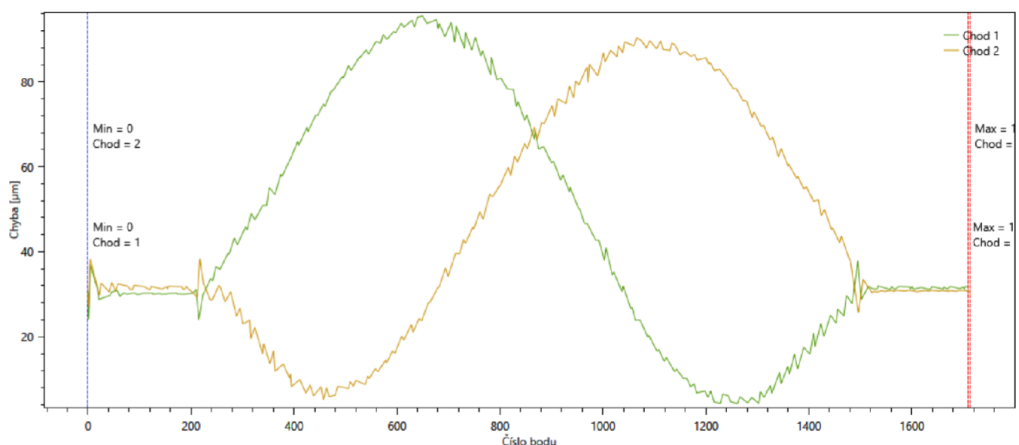
obr. 113 Vyhodnocení chyby  $E_{ZA}$

obr. 114 prezentuje výslednou chybu  $E_{ZA}$  měřenou technologií Ballbar TRACE, kde výsledná chyba dosahuje hodnoty 72,8  $\mu\text{m}$ . Měření bylo provedeno s aktivovanými kompenzacemi KinComp.



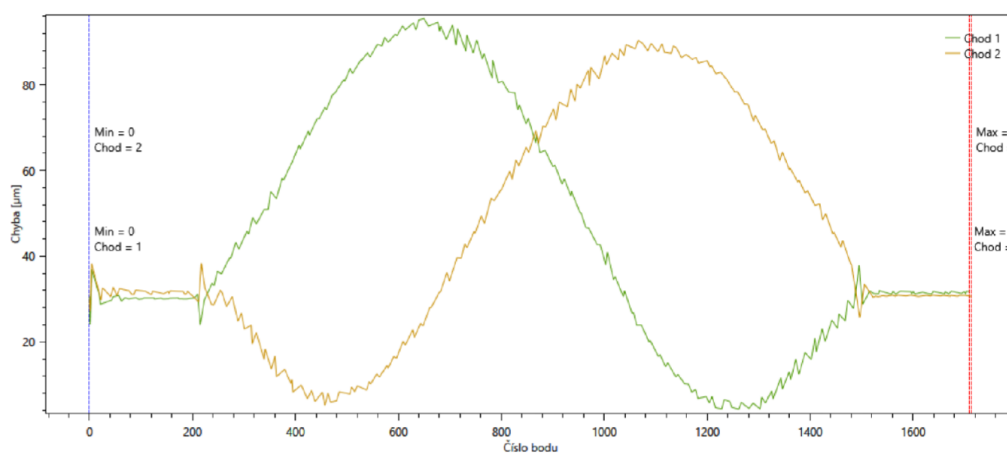
obr. 114 Vyhodnocení chyby E<sub>ZA</sub>

Na obr. 115 lze vidět výslednou chybu E<sub>XC</sub> měřenou technologií Ballbar TRACE, kde výsledná chyba dosahuje hodnoty 130,8 μm. Měření bylo provedeno bez aktivovaných kompenzací KinComp.



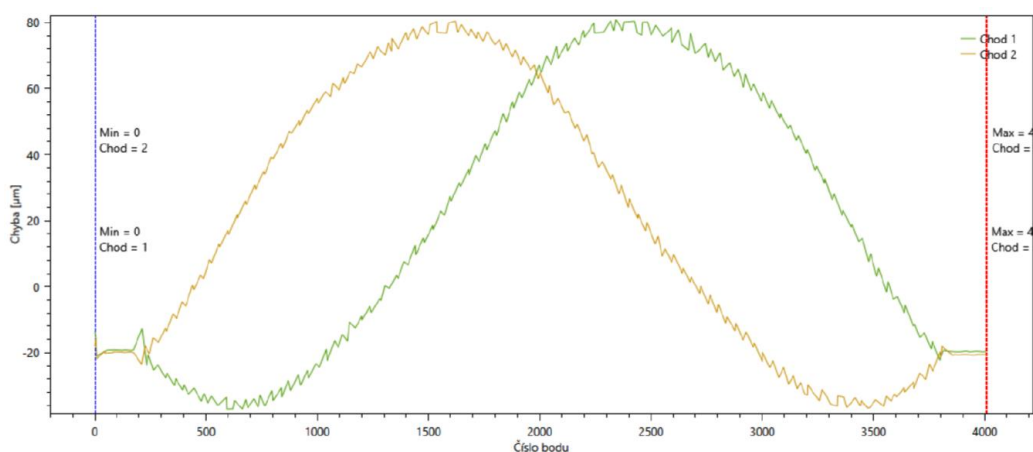
obr. 115 Vyhodnocení chyby E<sub>XC</sub>

obr. 116 ukazuje výslednou chybu E<sub>XC</sub> měřenou technologií Ballbar TRACE, kde výsledná chyba dosahuje hodnoty 91,2 μm. Měření bylo provedeno s aktivovanými kompenzacemi KinComp.



obr. 116 Vyhodnocení chyby Exc

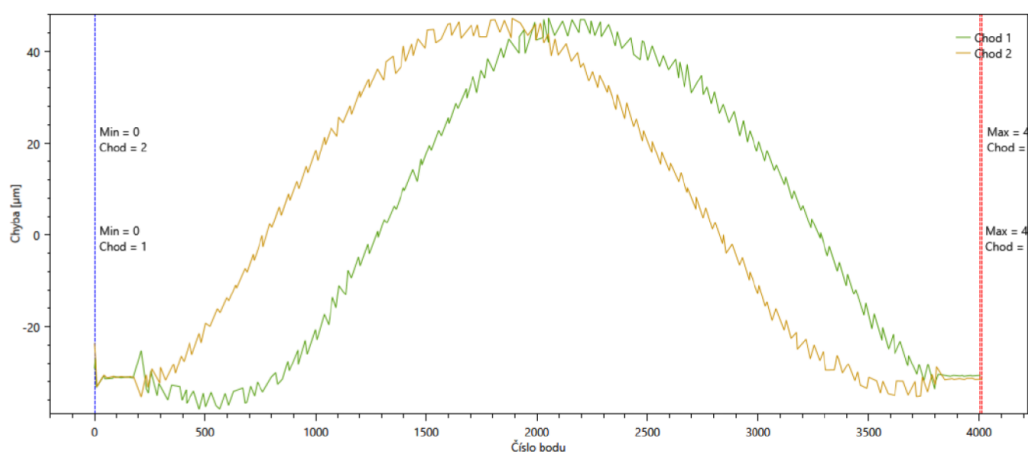
obr. 117 prezentuje výslednou chybu  $E_{YC}$  měřenou technologií Ballbar TRACE, kde výsledná chyba dosahuje hodnoty 118,1  $\mu\text{m}$ . Měření bylo provedeno bez aktivovaných kompenzací KinComp.



obr. 117 Vyhodnocení chyby  $E_{YC}$

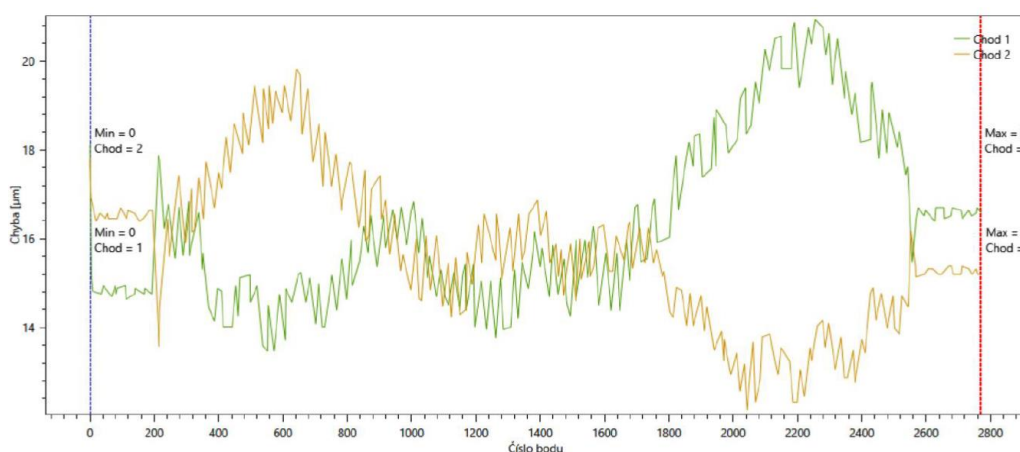
Na obr. 118 lze vidět výslednou chybu  $E_{YC}$  měřenou technologií Ballbar TRACE, kde výsledná chyba dosahuje hodnoty 85,2  $\mu\text{m}$ . Měření bylo provedeno s aktivovanými kompenzacemi KinComp.





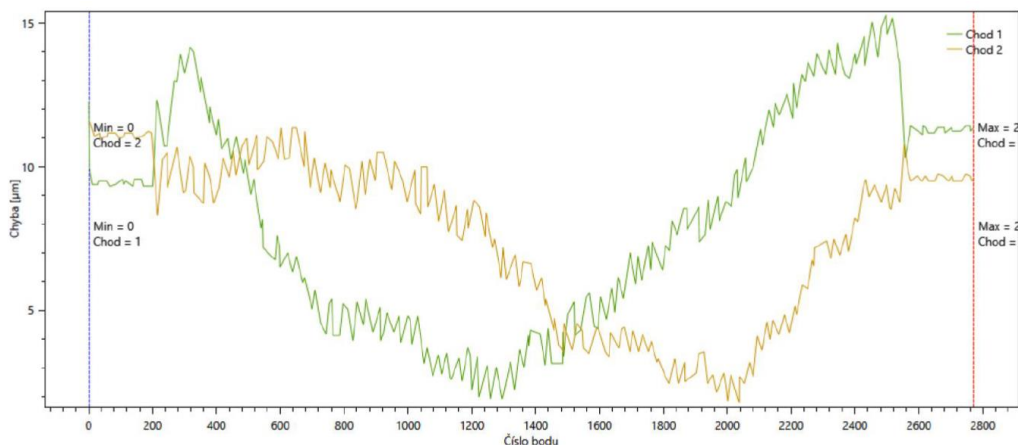
obr. 118 Vyhodnocení chyby Eyc

obr. 119 ukazuje výslednou chybu Ezc měřenou technologií Ballbar TRACE, kde výsledná chyba dosahuje hodnoty 8,8 µm. Měření bylo provedeno bez aktivovaných kompenzací KinComp.



obr. 119 Vyhodnocení chyby Ezc

obr. 120 prezentuje výslednou chybu Ezc měřenou technologií Ballbar TRACE, kde výsledná chyba dosahuje hodnoty 13,5 µm. Měření bylo provedeno s aktivovanými kompenzacemi KinComp.



obr. 120 Vyhodnocení chyby  $E_{ZC}$

Závěrem lze konstatovat, že u 66 % kontrolovaných parametrů došlo ke zlepšení. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 14.

tab. 14 Srovnání výsledků bez kompenzací a s kompenzací KinComp

	<i>S KinComp [μm]</i>	<i>Bez KinComp [μm]</i>	<i>Zlepšení/zhoršení [%]</i>
$E_{XA}$	8,7	3,9	55
$E_{YA}$	25,3	28,7	-13
$E_{ZA}$	81,6	72,8	11
$E_{XC}$	130,8	91,2	30
$E_{YC}$	118,1	85,2	28
$E_{ZC}$	8,8	13,5	-53

#### 4.4.9 Dílčí závěr

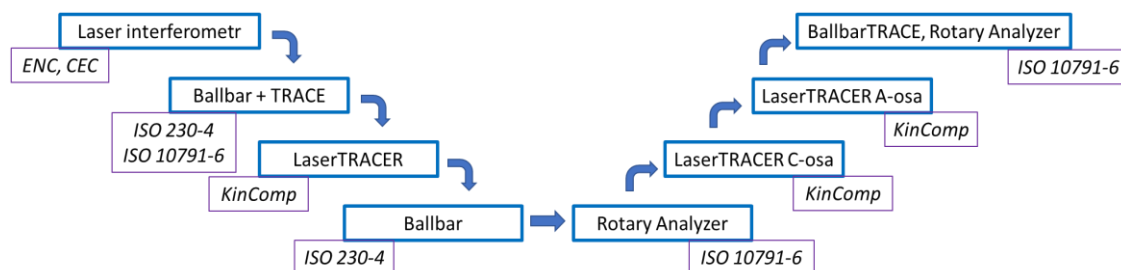
Navržená metodika slouží pro uživatele měřicí techniky, mezi které patří výrobci a dodavatelé pětiosých obráběcích strojů a pracovníci jejich servisu a údržby.

Mezi měřicí zařízení využitá v rámci předložené metodiky patří LaserTRACER, Laser intrefometr, Ballbar a Rotary analyzer.

Systémovým přístupem popsáním v metodice se očekává, že uživatelé získají více informací o kondici stroje/strojů, zvýší volumetrickou přesnost stroje, eliminují systematické chyby měření a zkrátí čas potřebný pro kontrolu a měření CNC obráběcích strojů.

Metodika je vzhledem k jejím technické a finanční náročnosti navržena primárně pro zavedení technologických postupů u výrobců obráběcích strojů. Od výrobců strojů se předpokládá postupné užití metodiky ke koncovým uživatelům pětiosých obráběcích strojů a u osob provádějící údržbu a servis těchto strojů.

Předložený metodický postup pro zavádění volumetrické kompenzace pětiosých obráběcích strojů s kinematikou „BK“ (obr. 99, obr. 100) může být modifikován dle specifikace samotného stroje. Jeden z takovýchto postupů je zobrazen na obr. 121.



obr. 121 Metodický postup zvyšování volumetrické přesnosti pětiosého obráběcího centra s kinematikou „BK“ a řídicím systémem Heidenhain

Na základě výše uvedeného postupu došlo ke zvýšení výsledné volumetrické přesnosti pětiosého obráběcího centra s kinematikou „BK“ o 60 % u lineárních os a o 10 % u kinematické rotační dvojice.

#### 4.5 DÍLČÍ ZÁVĚR

Jak ukázaly naše úvahy v kapitole 6.1, vznikla při volumetrické kompenzaci potřeba vytvoření nových komunikačních kanálů pro propojení dalších podpurných multisenzorických systémů. Dále se ukazuje, že pro CNC obráběcí stroje se zvýšenou přesností, kdy je mimo jiné aplikována volumetrická kompenzace, jsou nutné například konstrukční změny v oblasti teplotně symetrických koncepcí, snahu instalovat odměřování co nejbližší TCP, teplotně stabilizovat relevantní komponenty stroje, ale také zajistit dostatečně kvalitní základ a ukotvení stroje nebo osadit stroj dostatečným počtem senzorů. To jsou požadavky, které si doposud uvědomuje málo výrobců CNC obráběcích strojů.

V rámci kapitoly 6.2 je podrobněji popsán vliv nevhodného měření teploty na výslednou volumetrickou chybu stroje realizovaném na tříosém obráběcím centru MCV 754 QUICK, s. n. 805, KOVOSVIT-MAS. Z výsledku lze zřetelně identifikovat jednotlivé chyby, na které má teplota vliv a celkový podíl na chybě volumetrické. Z výsledků je patrné, že zaváděním kompromisů formou nevhodného umístění teplotních senzorů dochází k významnému ovlivnění výsledků, a tedy i kompenzačních hodnot.

V oblasti stavby CNC strojů a jejich kontroly geometrické přesnosti neexistuje ucelená koncepce, která by popisovala nasazení moderních přístrojů (LaserTRACER, Laser Tracker, BlueSYSTEM, SEA, Laser interferometr, Ballbar), dále stanovila jednoznačný postup a pravidla která je třeba dodržet pro úspěšné řešení problematiky stavby strojů a kontroly geometrické přesnosti strojů. Důležité je též monitorovat počáteční podmínky pro možnou implementaci progresivních technologií a definovat ucelené postupy pro správnou implementaci progresivních technologií do stavby a kontroly geometrické přesnosti CNC obráběcích strojů.

Nově autorem navržená metodika systémovým způsobem odstraňuje výše uvedené nedostatky. Rovněž lze konstatovat, že v současné době u výrobců CNC obráběcích strojů neexistuje metodika, která by popisovala ucelené postupy měření pro nasazení přístrojů do stavby strojů a kontroly geometrické přesnosti CNC obráběcích strojů.

Zásadní přínos a inovativní prvek rozpracované metodiky spočívá ve vzájemném provázání dílčích poznatků a funkcionalit do jednoho celku „progresivní měřicí technologie – CNC obráběcí stroj“. Nově navržená metodika umožní docílit správného vyhodnocení a nasazení korekcí a kompenzací jak ve fázi mechanického vyrovnaní komponent strojů (stavba strojů), tak zavádění korekce do řídicího systému stroje (geometrická kontrola strojů).

Novost lze spatřovat i v tom, že navržený postup je možné uplatnit na libovolnou kinematickou strukturu CNC obráběcího stroje, který bude osazen libovolným řídicím systémem. Podle typu a verze lze dále provést buď pouze dílčí úkol, anebo posouzení geometrické přesnosti stroje ve stavbě a při kontrole geometrické přesnosti. Sumárně lze prohlásit, že hlavními přínosy a novost rozpracované metodiky jsou v synergickém efektu moderních přístrojů použitých pro stavbu a kontrolu geometrické přesnosti CNC obráběcích celků. Dále získání nových informací o aktuálním stavu kvality obráběcího stroje ve fázi stavby a kontroly geometrické přesnosti stroje a zavádění korekcí a kompenzací ve fázi stavby stroje a kontroly geometrické přesnosti stroje. Předložená certifikovaná metodika cílí na systémový přístup zvyšování geometrické přesnosti dosažené ve dvou fázích stavby a oživení stroje. V první fázi se jedná o mechanické seřízení a vyrovnaní stroje s doložitelnou opakovatelností procesu. Druhá fáze je nasazení softwarových kompenzací pro mechanicky seřízený stroj.

Nejvíce složitými CNC obráběcími stroji jsou ty, které používají pro interpolaci svých os při obrábění pět a více os. Těmto strojům je věnována v poslední době zvýšená pozornost. I zde však chybí metodika pro aplikaci vrcholu kompenzací, a sice volumetrickou kompenzaci. Autor se spolupracujícím týmem ji navrhl a tato metodika pak úspěšně prošla certifikací. Předkládaná metodika popisuje inovativní způsob nasazení trackovacích laserových interferometrů s cílem zvýšení jejich volumetrické přesnosti.

Metodika přináší nové poznatky a možnosti zlepšení procesů v oblasti kontroly geometrické přesnosti obráběcích strojů. Využitím získaných znalostí a zavedením volumetrických kompenzací je docíleno zvýšení jejich pracovní přesnosti.

Nedílnou součástí navrhovaného řešení je rovněž zajištění efektivní práce s informacemi získanými kontrolou volumetrické přesnosti obráběcích strojů. V současné době u výrobců strojů nejsou dostatečně zavedené postupy pro zavádění volumetrických kompenzací pětiosých obráběcích strojů a s tím spojené zpracování dat. V takovémto případě nelze efektivně pracovat z naměřenými a vyhodnocenými informacemi. Nasazením navržené metodiky je předpoklad odstranění tohoto nedostatku a získané informace bude možné využít při následných inovacích v procesu zvyšování volumetrické přesnosti tříosých a pětiosých obráběcích center.

Systémovým přístupem popsaným v této metodice se očekává, že uživatelé získají více informací o kondici stroje/strojů, zvýší volumetrickou přesnost stroje, eliminují systematické chyby měření a zkrátí čas potřebný pro kontrolu a měření CNC obráběcích strojů.

Metodika je vzhledem k jejich technické a finanční náročnosti navržena primárně pro zavedení technologických postupů u výrobců obráběcích strojů. Od výrobců strojů se předpokládá postupné užití metodiky ke koncovým uživatelům pětiosých obráběcích strojů a u osob provádějící údržbu a servis těchto strojů.

## 5 ZVYŠOVÁNÍ PRACOVNÍ PŘESNOSTI POMOCÍ VOLUMETRICKÝCH KOMPENZACÍ

*Tato kapitola obsahuje výsledky a postupy zaměřené do oblasti posuzování a zvyšování pracovní přesnosti obráběcích strojů pomocí volumetrických kompenzací, které byly publikovány v odborných časopisech na základě řešených projektů NETME CENTRE PLUS LO1202, FSI a DMS OP VVV CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_026/0008404 s podílem autora na zaslané publikaci [73] (50 %) a dále výsledky související s přípravou publikace plánované v rámci řešeného projektu DMS OP VVV CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_026/0008404. Prezentované výsledky vznikly spoluprací autorů Ing. Michal Holub Ph.D., doc. Mgr. Jaroslav Hrdina, Ph.D., doc. Ing. Róbert Jankových, CSc., Ing. Tomáš Marek, Ph.D., Ing. Jiří Tůma, Ph.D., doc. Mgr. Petr Vašík, Ph.D., Ing. Jan Vetiška, Ph.D., Ing. Jan Smolík, Ph.D., Ing. Petr Heinrich, Ing. Róbert Hrušecký, Ph.D., Mgr. Jitka Zatočilová, Ph.D.*

### 5.1 ÚVOD DO OBLASTI ZVYŠOVÁNÍ PRACOVNÍ PŘESNOSTI

Pokročilé měřicí technologie představují vysoký potenciál pro další zvyšování pracovní přesnosti obráběcích strojů. Jak bylo popsáno v úvodu, jedná se o obrábění zkušebního obrobku nebo sady zkušebních obrobků. Obrábění zkušební dílce probíhá převážně pod plnou kontrolu výrobce stroje a jeho dodavatelů. Jejich snahou je docílit co nejlepšího nastavení stroje a řezného procesu, ale také zajištění stabilního okolního prostředí, precizně seřízených nástrojů a jiných periférií stroje.

V rámci kapitoly 5 jsou prezentovány dvě případové studie popisující vliv volumetrické přesnosti na pracovní přesnosti. Jedná se vždy o obrábění na malém vertikálním obráběcím frézovacím centru MCV754 QUICK (MCV) z produkce firmy KOVOSVIT MAS s řídicím systémem Siemens Sinumerik 840 Dsl. Stroj MCV byl kompenzován na základě opce VCSA3, přičemž měření bylo realizováno pomocí přístroje LaserTRACER a principu sekvenční multilaterace.

První případová studie byla zaměřena na posouzení vlivu volumetrické kompenzace na tvarovou přesnost obrobku. Jako posuzovaný tvar byl vybrán obrobek ve tvaru válce, přičemž byla kontrolována kruhovitost vnitřního a vnějšího rozměru. Tvar obrobku byl vybrán z důvodu dostupnosti měřicího zařízení, které odpovídalo svojí maximální

dovolenou chybou měření předpokládaným odchylkám na obrobku. Obrobky byly potom měřeny na pracovišti ČMI (Český metrologický institut).

Druhá případová studie byla zaměřena na posouzení vlivu volumetrické kompenzace na rozměrovou a tvarovou přesnost obrobku daného normou ISO 10791-7:2014. Tvar a rozměry obrobku odpovídají rozměrovým i technologickým možnostem stroje MCV. Obrobky byly měřeny na pracovišti MTF v Trnavě, které disponuje vysoce precizním měřicím souřadnicovým strojem Zeiss PRISMO ultra s nejistotou měření  $0,5 + L / 500 \mu\text{m}$  (obr. 122).



*obr. 122 CMM Zeiss PRISMO ultra*

## **5.2 PŘÍPADOVÉ STUDIE**

V rámci habilitační práce jsou prezentovány dvě případové studie zaměřené na popsání závislosti volumetrické přesnosti na pracovní přesnosti stroje. Obě případové studie jsou realizovány na stroji MCV 754QUICK s řídicím systémem Sinumerik 840 Dsl instalovaným na pracovišti ÚVSSR, FSI, VUT v Brně. Případová studie vlivu volumetrické přesnosti na výsledné pracovní přesnosti – kruhovitosti byla zpracována v rámci projektu Strojírenská výrobní technika a přesné strojírenství, DMS OP VVV CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_026/0008404 a byla aktuálně odeslána k publikování do časopisu International Journal of Precision Engineering and Manufacturing (Springer).

### **5.2.1 Případová studie vlivu volumetrické přesnosti na výsledné pracovní přesnosti - kruhovitosti**

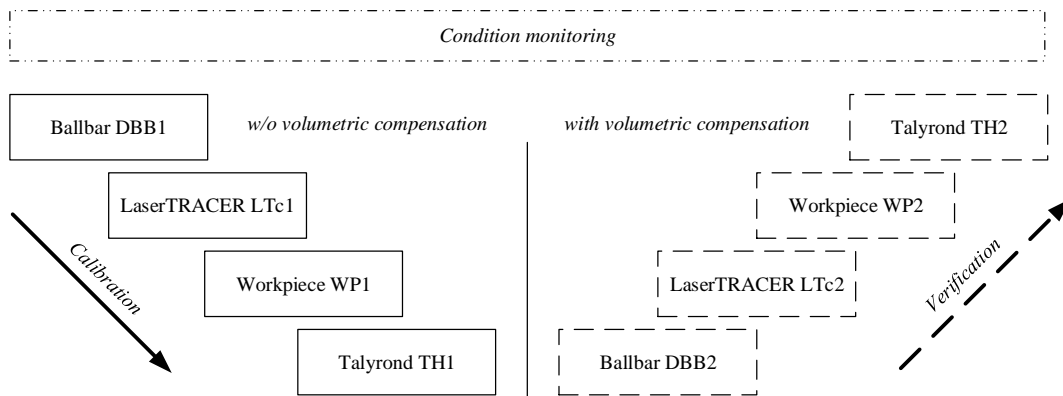
Případová studie je zaměřena na ověření závislosti volumetrické přesnosti stroje a pracovní přesnosti. Jak je patrné z předchozího výkladu, tak geometrická přesnost je v tomto případě reprezentována volumetrickou přesností. Měření volumetrické přesnosti je založené na měření nepřímou metodou samonaváděcího laserového interferometru LaserTRACER. Výrobní přesnost je realizována na zkušebním obrobku navrženého pro ověření chyby kruhovitosti. Ta je následně verifikována na měřicím zařízení Talyrond 595S. Výsledky kruhovitosti z obrobku jsou srovnány s výsledky získanými na základě zkoušky kruhové interpolace dle ISO 230-4:2005. Použitým měřicím zařízením je Ballbar QC20-w.

#### ***A. Návrh experimentu***

Nastavení experimentu je graficky zobrazeno na obr. 123. Experiment je rozdělen do dvou částí. V první části je provedeno měření tříosého obráběcího stroje v jeho základním nastavení, tj. bez softwarových kompenzací geometrických chyb stroje. V druhém nastavení je provedena kompenzace volumetrické přesnosti. Na stroji nebyly aktivovány žádné jiné kompenzace geometrických chyb stroje. V průběhu celého procesu měření je nezbytné monitorovat stav okolního prostředí.

V obou částech experimentu bylo provedeno měření kruhové interpolace dle ISO 230-4 [29] přístrojem Ballbar QC20-w, RENISHAW pro obrábění bez kompenzací DBB1 a pro obrábění s volumetrickými kompenzacemi DBB2. Následovali měření volumetrické přesnosti přístrojem LaserTRACER, ETALON ve stavu bez kompenzací LTc1 a s aktivovanými volumetrickými kompenzacemi LTc2. Dalším krokem bylo obrobení zkušebního obrobku bez softwarových geometrických kompenzací WP1 a s aktivovanými volumetrickými kompenzacemi WP2. V posledním kroku každého z cyklu byla provedena kontrola tvarové přesnosti – kruhovitosti na přístroji Talyrond 595S, firmy TYLOR HOBSON (dále jen Talyrond 595S) opět pro obrobek bez aktivovaných softwarových kompenzací TH1 a s aktivovanými volumetrickými kompenzacemi TH2.



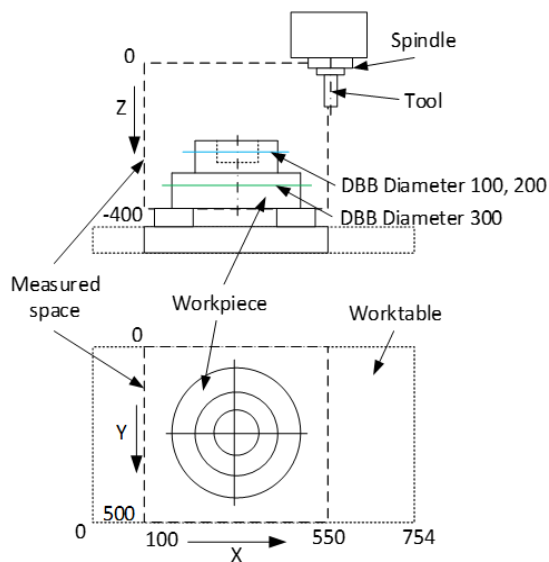


obr. 123 Schéma navrženého experimentu

### B. Umístění obrobku v pracovním prostoru stroje

Obrábění zkušebních obrobků bylo realizováno na tříosém vertikálním obráběcím stroji s řídicím systémem Siemens Sinumerik 840D sl s opcí VCS A3 (Volumetric Compensation System for 3 axis machine tools).

Na obr. 124 je znázorněno schéma nastavení experimentu na obráběcím stroji. Dále umístění obrobku v pracovním prostoru stroje, pozice měřicích zařízení a rozsah zkoušky kruhové interpolace a v neposlední řadě kompenzovaný pracovní prostor stroje.

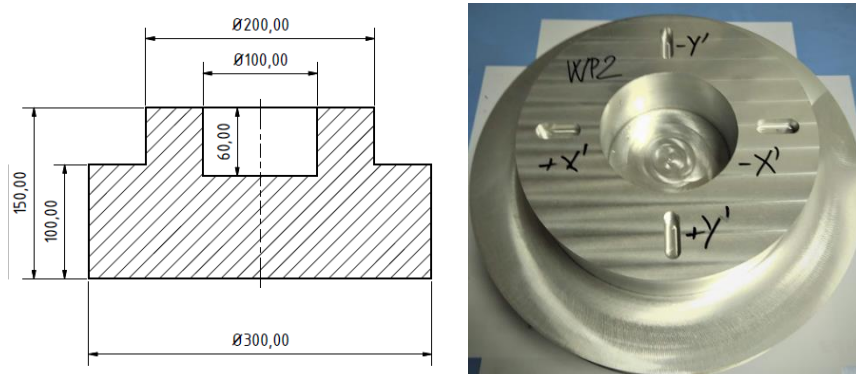


obr. 124 Schéma umístění obrobku v pracovním prostoru stroje

### C. Podmínky obrábění

Tvar a rozměry obrobku byly zvoleny tak, aby byly co nejvíce ve shodě s rozměry testu dle ISO 230-4:2005 zkouška kruhové interpolace dvou lineárních os. Na obrobku jsou kontrolovány tři průměry 100/200/300 mm (obr. 125 vlevo).

Technologie obrábění, materiál obrobku, poloha obrábění a způsob upnutí byly shodné pro oba dílce. Rozměry obrobku a jeho tvar po opracování je znázorněn na obr. 125 vpravo.



obr. 125 Schéma zkušební obrobku, obrobený zkušební kus

Parametry obrábění zkušebních obrobků jsou popsány v tab. 15.

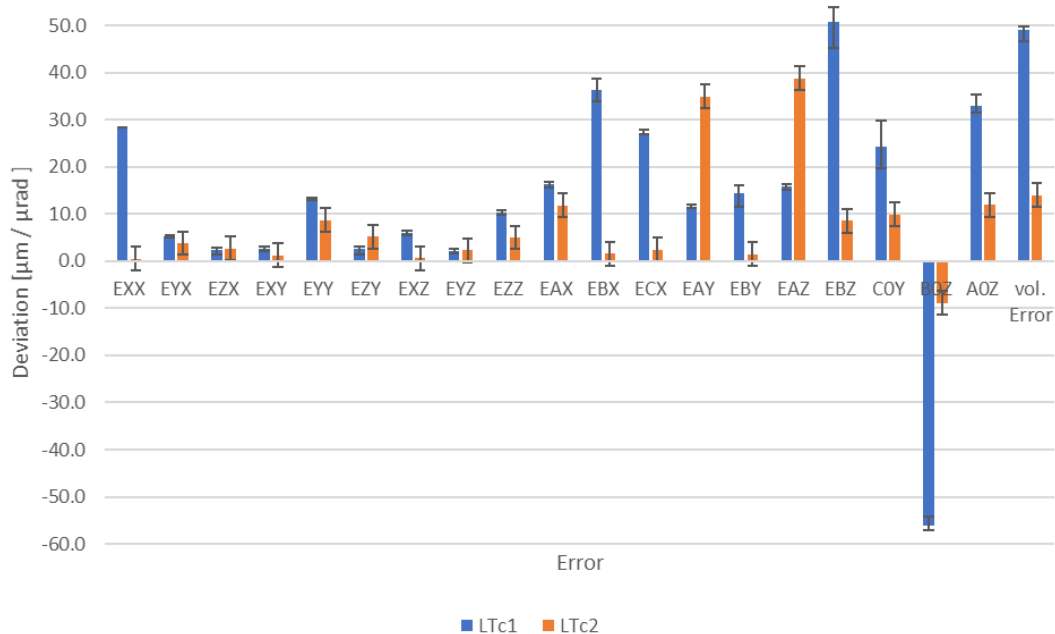
tab. 15 Parametry obrábění

Cutting Parametr	Speed	200 m/min
	Feed	0,1 mm/zub
	Depth	0,02 mm
	Width	50 mm
Cutting tool spec.	Material	Solid Carbon
	Type	Endmill
	No. of flutes	4
	Diameter	16 mm
	Holder	ISO40 ER25
Material spec.	Material	EN AW-2007
	Dimension	φ300-150 mm

### D. Výsledek experimentu

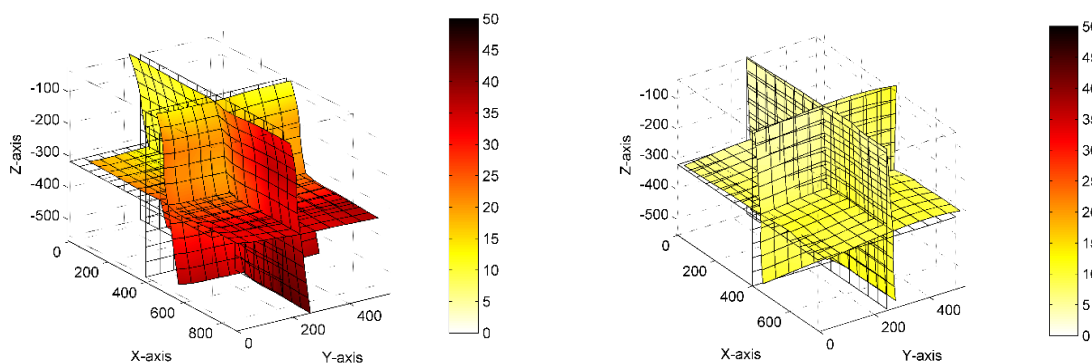
Volumetrická přesnost stroje byla vyhodnocena pro kalibraci LTc1 a verifikaci LTc2. V rámci provedeného experimentu byly zjištěny následné geometrické chyby stroje, včetně jeho volumetrické chyby. Na obr. 126 jsou znázorněny chyby získané z měření

přístrojem LaserTRACER jak pro kalibrační, tak pro verifikační měření pracovního prostoru stroje. Chyby jsou popsány dle konvence ISO 230-1:2012.



obr. 126 Zobrazení výsledků kalibračního a verifikačního měření

Na obr. 127 je graficky znázorněno rozložení volumetrických chyb v prostoru stroje. Z výsledků je patrné, že došlo k výraznému snížení volumetrické chyby ze 49 μm na 14 μm. Dále došlo ke snížení chyb polohování v osách  $E_{XX}$ ,  $E_{YY}$  a  $E_{ZZ}$  a výraznému snížení chyb kolmosti dvou vzájemných os  $E_{COY}$ ,  $E_{BOZ}$  a  $E_{AOZ}$ . Tyto chyby se současně zmenšily také u výsledků získaných ze zkoušky kruhové interpolace dle ISO 230-4:2005.

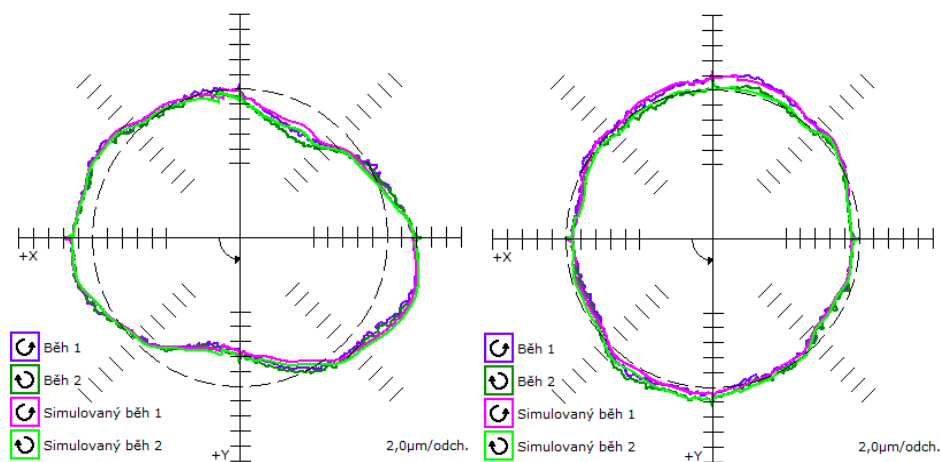


obr. 127 Grafická interpretace volumetrické chyby bez aktivovaných VCS a s aktivovanými VCS

Geometrická přesnost obráběcího stroje byla popsána zkouškou kruhové interpolace dle ISO 230-4:2005. Vyhodnocení jednotlivých chyb stroje bylo provedeno pomocí expertního software, který je součástí zařízení Ballbar QC20-w.

V rámci provedeného testu je vyhodnocena vždy geometrická přesnost bez volumetrické kompenzace DBB1 a s volumetrickou kompenzací DBB2.

Na obr. 128 jsou znázorněny výsledky měření kruhové interpolace v rovině XY na průměru 300 mm, při posuvové rychlosti 400 mm/min.



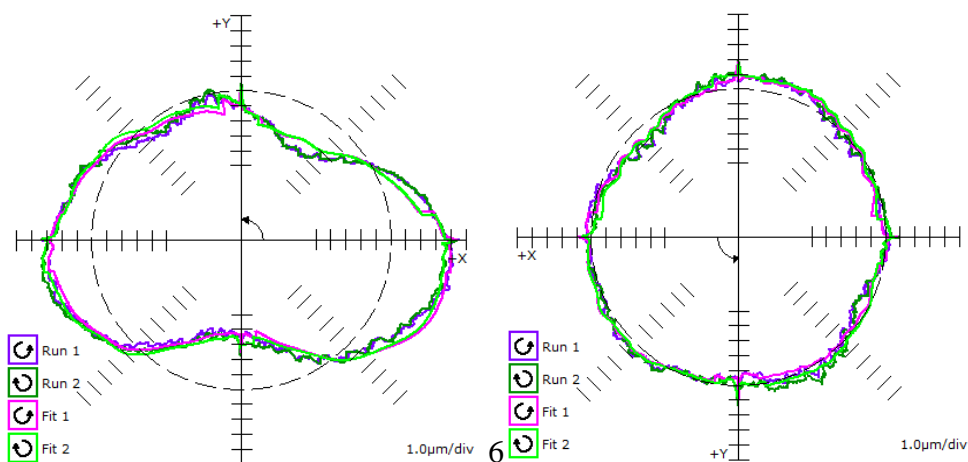
obr. 128 Zkoušky kruhové interpolace v rovině XY, průměr 300 mm dle ISO 230-4:2005 bez aktivovaných VSC a s aktivovanými VCS

tab. 16 ukazuje vybrané parametry testu kruhovitosti pro zkoušky DBB1 a DBB2 v rovině XY a kontrolovaném průměru 300 mm.

tab. 16 Vybrané parametry testu v rovině XY, průměr 300 mm

XY - 300	Circularity [μm]	Squareness [μm/m]	Scaling mismatch [μm]	Positional tolerance [μm]	Uncertainty [μm]
DBB1	10,5	22,4	12,3	27,6	± 0,8
DBB2	4,5	-6,2	-4,0	8,4	± 0,7

obr. 129 prezentuje výsledky měření kruhové interpolace v rovině XY na průměru 200 mm, při posuvové rychlosti 400 mm/min.



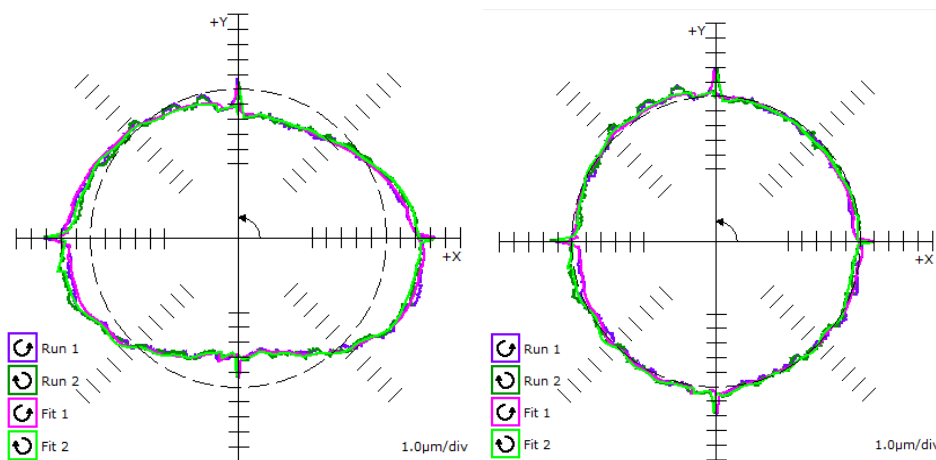
obr. 129 Zkoušky kruhové interpolace v rovině XY, průměr 200 mm dle ISO 230-4 bez aktivovaných VSC a s aktivovanými VCS

tab. 17 ukazuje jednotlivé parametry testu zkoušky kruhové interpolace v rovině XY na průměru 200 mm.

tab. 17 Vybrané parametry testu v rovině XY, průměr 200 mm

XY - 200	Circularity [μm]	Squareness [μm/m]	Scaling mismatch [μm]	Positional tolerance [μm]	Uncertainty [μm]
DBB1	8,3	10,5	9,6	20,0	± 0,7
DBB2	3,5	-6,3	-0,9	4,8	± 0,7

Na obr. 130 jsou znázorněny výsledky měření kruhové interpolace v rovině XY na průměru 100 mm, při posuvové rychlosti 400 mm/min.



obr. 130 Zkoušky kruhové interpolace v rovině XY, průměr 100 mm dle ISO 230-4 bez aktivovaných VSC a s aktivovanými VCS

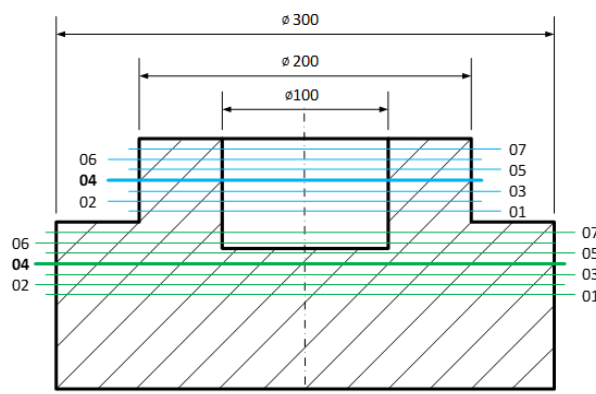
V tab. 18 jsou potom zobrazeny jednotlivé parametry testu zkoušky kruhové interpolace v rovině XY na průměru 100 mm.

tab. 18 Vybrané parametry testu v rovině XY, průměr 100 mm

XY - 100	Circularity [μm]	Squareness [μm/m]	Scaling mismatch [μm]	Positional tolerance [μm]	Uncertainty [μm]
DBB1	5,7	13,8	7,6	12,2	± 0,7
DBB2	2,7	4,8	-0,7	4,6	± 0,7

Z výše uvedených výsledků je patrné, že volumetrická kompenzace má značný podíl na zvýšení geometrické přesnosti stroje. Chyba kruhovitosti na průměru 300 mm v rovině XY se zmenšila z 10,5 μm na 4,5 μm. Z výsledků zobrazených na obr. 128, obr. 129 a obr. 130 je patrné, že došlo i ke zlepšení tvarové přesnosti. Výše uvedené výsledky jsou ovšem realizovány v nezátíženém stavu, tzn. bez tíhové síly od obrobku a sil od obrábění.

Obrobky byly kontrolovány na přístroji Taylron 595S s tím, že obrobek byl vždy měřen v sedmi řezech na každém z posuzovaných průměrů v rozestupu 5 mm. Schéma měřených poloh je zobrazeno na obr. 131. Polohy průměru 100 a 200 mm jsou shodné a jsou označeny modrou barvou. Polohy měřených bodů na průměru 300 mm jsou označeny zelenou barvou. Poloha 4 u měřených průměrů je reprezentativní a tyto výsledky jsou dále zobrazeny jako tvary naměřených kruhovitostí obrobku.



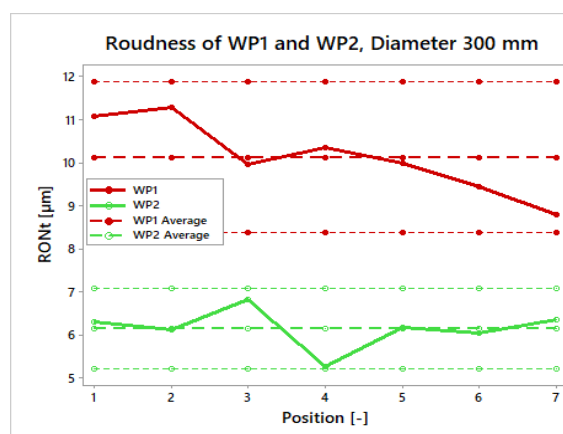
obr. 131 Schéma měřených bodů na zkušebním obrobku pro průměry 300, 200 a 100 mm

**V Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** tab. 19 jsou potom zobrazeny naměřené hodnoty dle výše uvedeného schématu. Pro vyhodnocení velikosti kruhovitosti obrobku a možnosti srovnání s výsledky Ballbaru jsou vypočteny aritmetické průměry pro obrobek WP1 a WP2.

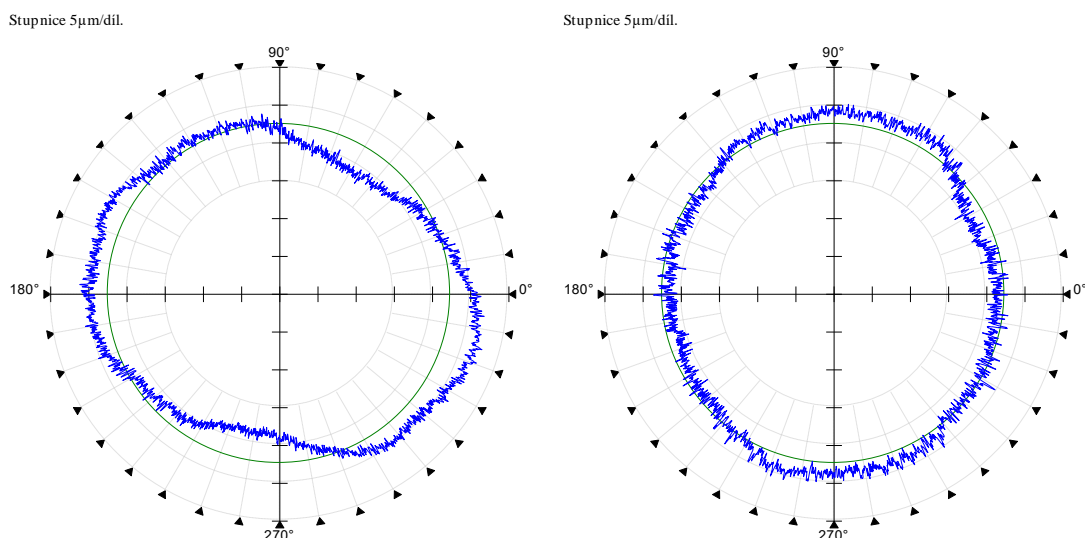
Na obr. 132 je znázorněna kruhovitosť vnějšího průměru 300 mm. Zde došlo ke zlepšení kruhovitosti z 10,13  $\mu\text{m}$  na 6,16  $\mu\text{m}$ . Na obr. 133 je znázorněn výsledek měření v pozici 04 dle tab. 19 a dle obr. 131.

tab. 19 Výsledky kruhovitosti RONt [ $\mu\text{m}$ ] – průměr 300 mm

Diameter 300	Position [-]	RONt [ $\mu\text{m}$ ]	
		WP1	WP2
	01	11,09	6,30
	02	11,28	6,12
	03	9,97	6,83
	04	10,36	5,28
	05	9,98	6,19
	06	9,44	6,04
	07	8,81	6,37
<b>average</b>		<b>10,13</b>	<b>6,16</b>



obr. 132 Vyhodnocení chyby kruhovitosti, průměr 300 mm

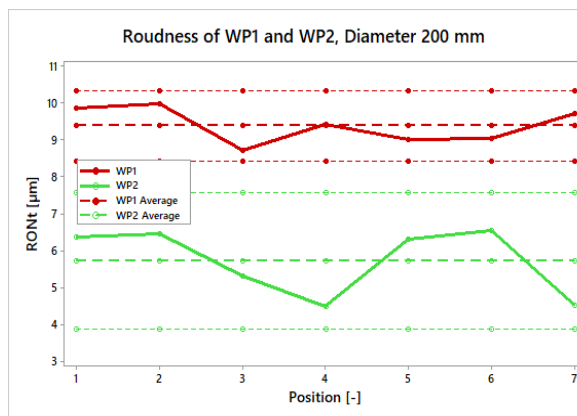


obr. 133 Grafické zobrazení chyby kruhovitosti na průměru 300 mm

obr. 134 ukazuje kruhovitost vnějšího průměru 200 mm. Zde došlo ke zlepšení kruhovitosti z 9,39  $\mu\text{m}$  na 5,71  $\mu\text{m}$ . Na obr. 135 je pak znázorněn výsledek měření v pozici 04 dle tab. 20 a dle obr. 131.

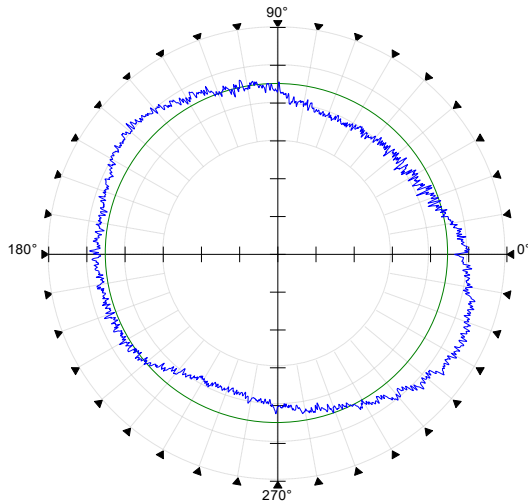
tab. 20 Výsledky kruhovitosti RONt [ $\mu\text{m}$ ] – průměr 200 mm

Diameter 200	Position [-]	RONt [ $\mu\text{m}$ ]	
		WP1	WP2
	01	9,87	6,36
	02	9,97	6,45
	03	8,73	5,30
	04	9,43	4,49
	05	9,01	6,31
	06	9,03	6,55
	07	9,71	6,51
<b>average</b>		<b>9,39</b>	<b>5,71</b>

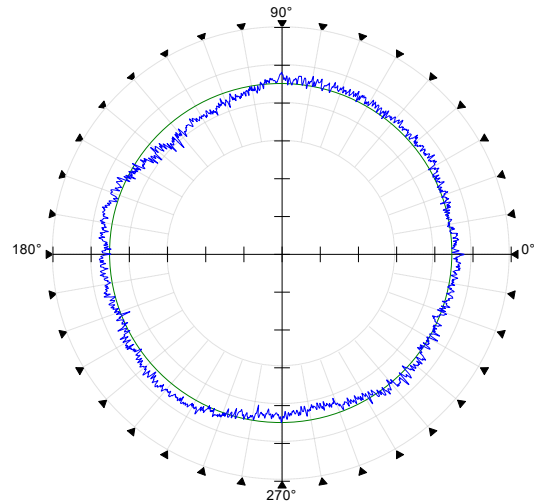


obr. 134 Vyhodnocení chyby kruhovitosti, průměr 200 mm

Stupnice 5 $\mu$ m/díl.



Stupnice 5 $\mu$ m/díl.

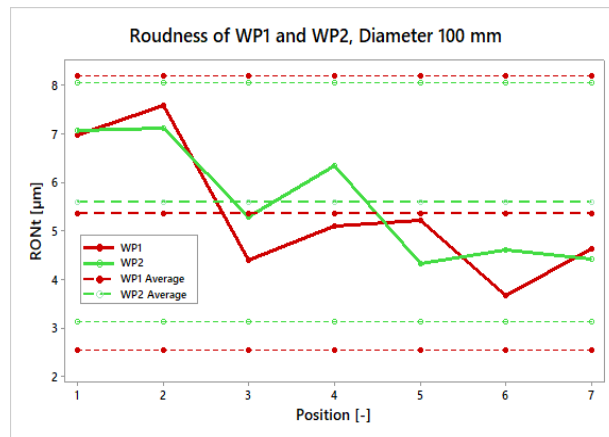


obr. 135 Grafické zobrazení chyby kruhovitosti na průměru 200 mm

Na obr. 136 je prezentována kruhovitost vnitřního průměru 100 mm. Zde nedošlo ke zlepšení kruhovitosti, naopak došlo k zanedbatelnému zhoršení výsledku z 5,37  $\mu$ m na 5,59  $\mu$ m. Na obr. 137 je znázorněn výsledek měření v pozici 04 dle tab. 21a dle obr. 131.

tab. 21 Výsledky kruhovitosti RONt [ $\mu$ m] – průměr 100 mm

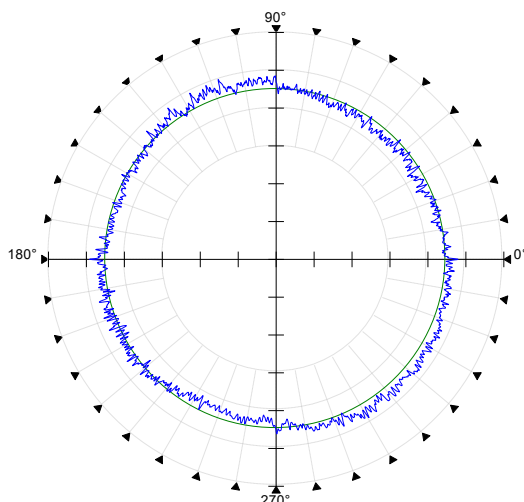
Diameter 100	Position [-]	RONt [ $\mu$ m]	
		WP1	WP2
	01	6,97	7,07
	02	7,59	7,11
	03	4,39	5,29
	04	5,10	6,34
	05	5,22	4,33
	06	3,68	4,60
	07	4,64	4,41
<b>average</b>		<b>5,37</b>	<b>5,59</b>



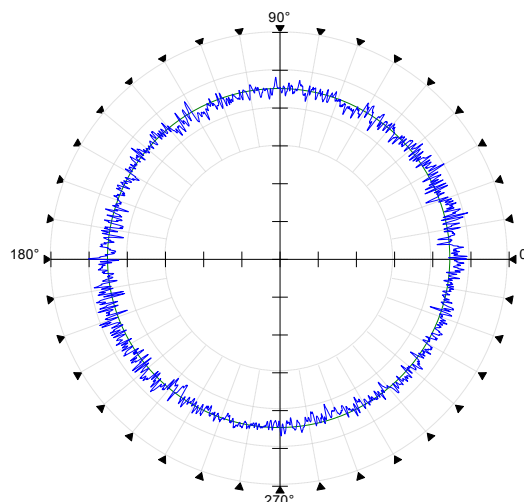
obr. 136 Vyhodnocení chyby kruhovitosti, průměr 100 mm



Stupnice 5 $\mu$ m/díl.



Stupnice 5 $\mu$ m/díl.



obr. 137 Grafické zobrazení chyby kruhovitosti na průměru 100 mm

V tab. 22 jsou shrnuty naměřené výsledky na stroji bez zatížení pomocí zkoušky kruhové interpolace dle ISO 230-4:2005 a výsledky kruhovitosti obrobku změřené na kruhoměru Talyrond 595S.

tab. 22 Srovnání výsledků kruhovitosti na DBB a WP

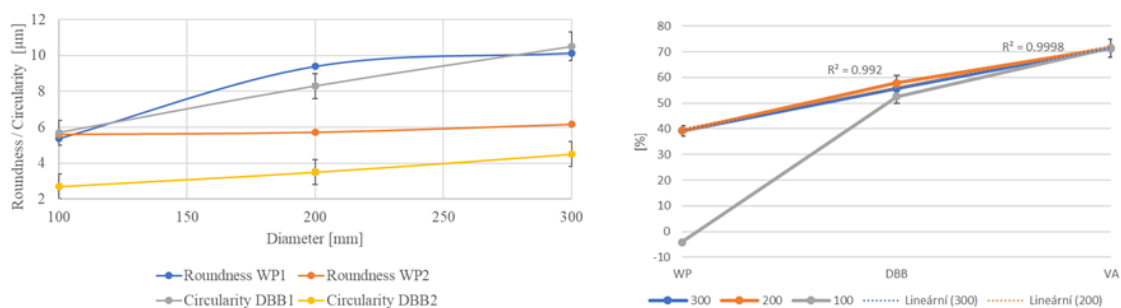
<b>Diameter [mm]</b>	<b>DBB1/WP1 [<math>\mu</math>m]</b>	<b>DBB2/WP2 [<math>\mu</math>m]</b>
300	10,5/10,13	4,5/6,16
200	8,3/9,39	3,5/5,71
100	5,7/5,37	2,7/5,59

Srovnání výsledků je dále použito pro stanovení poměru mezi geometrickou/volumetrickou/pracovní přesností stroje. Jednotlivé závislosti mezi příslušnými parametry jsou dále popsány v následující kapitole.

### **E. Diskuze**

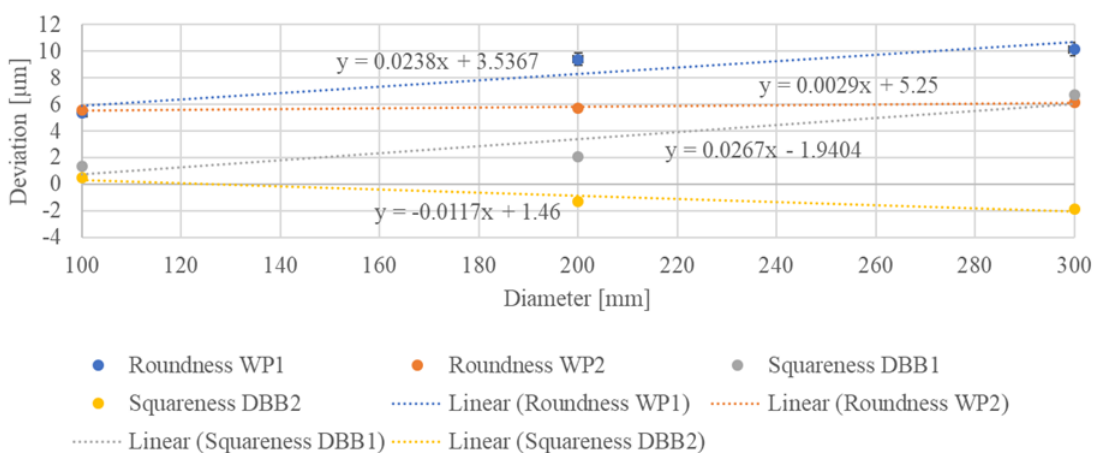
Při pohledu na obr. 138 lze pro obrábění kruhových součástí vidět závislost mezi chybou kruhovitosti na obrobku a velikostí obráběného průměru (obr. 138 vlevo). Dále je možné pozorovat u WP2 relativně konstantní hodnotu kruhovitosti na všech kontrolovaných průměrech. U obrobku WP1 je vidět zlepšování hodnoty kruhovitosti se snižující se velikostí obráběného průměru. Chyby kruhovitosti DBB1 a DBB2 potom vykazují lineární závislost mezi velikostí chyby a velikostí obráběného průměru. S velikostí obráběného průměru roste i velikost chyby kruhovitosti.

Na obr. 138 vpravo je zobrazen graf závislosti procentuálního zlepšení na volumetrické přesnosti (VA), circularity (DBB) a roundness (WP) ve stavu před volumetrickou kompenzací a po volumetrické kompenzaci stroje. U technologie vnějšího frézování a průměry 300 a 200 mm je patrna silná lineární závislost mezi WP – DBB – VA s indexy determinace  $I^2$  rovnými 0,9998 (300 mm) a 0,992 (200 mm). Na průměru 100 mm je pozorovat dokonce zhoršení chyby kruhovitosti o 4 %. Toto zhoršení je možné přisoudit jinému typu technologie obrábění a vymezení vůlí vlivem poddajnosti soustavy. Popis tohoto chování bude předmětem dalšího výzkumu.



obr. 138 Zobrazení závislosti mezi kruhovitostí obrobku a stroje

Z následujícího grafu (obr. 139) je potom zřejmá závislost mezi kolmostí naměřenou v rovině obrábění XY bez zatížení přístrojem Ballbar (DBB1 a DBB2) a kruhovitostí získanou z měření obrobků (WP1 a WP2). Vyšší míru korelace lze vidět u DBB1 a WP1. To lze přisuzovat vyšší hodnotě chyby kolmosti, která se projeví také vyšší mírou na obrobku. Naopak chyba kolmosti u DBB2 byla redukována vůči DBB1 o 72 %. Zde nemá chyba kolmosti na výsledné kruhovitosti takový dominantní vliv, což se projeví i na korelaci mezi DBB2 a WP2.



obr. 139 Zobrazení závislosti chyby kruhovitosti a kolmosti na obráběném průměru

Získané znalosti o chování obráběcích strojů z pohledu geometrické přesnosti je možné dál využívat pro predikování rozměrových a tvarových chyb obrobků. Výsledky jsou uplatnitelné pro technologie dokončovacích operací, kde jsou síly od obrábění zanedbatelné a nezatíží stroj deformacemi od statické poddajnosti.

Zlepšení volumetrické přesnosti malého tříosého obráběcího stroje o 70 % se projeví až 58% zlepšením na kruhovitosti bez zatížení měřeném dle ISO 230-4:2005 a dále 40% zlepšením na tvarové přesnosti obrobku (roundness) při podmínkách dokončovacího obrábění.

Z výsledku experimentu je dále patrné, že u chyby kruhovitosti hraje významnou roli chyba kolmosti dvou vzájemných os v rovině obrábění, a to jak u zkoušky kruhové interpolace dvou lineárních os dle ISO 230-4:2005, tak i s dopadem na chybu kruhovitosti obrobku.

U malého CNC obráběcího stroje, mezi které patří zkoumaný MCV 754QUICK, bylo dosaženo 40% zlepšení chyby kruhovitosti na obrobku díky aktivací volumetrickou kompenzací. Čistá doba měření zde byla 50 min, doba včetně polohování LaserTRACERU a zavádění kompenzací včetně verifikace zařízením Ballbar QC20-w přibližně 125 min. Z pohledu času potřebného pro proměření stroje, zavedení kompenzačních tabulek a verifikace se jedná o vysoce efektivní způsob zvyšování výrobní přesnosti.

Další výzkumná činnost v této oblasti bude zaměřena na ověřování rozměrové přesnosti za různých podmínek obrábění.

Tyto výsledky mají potenciál dále zefektivňovat kompenzace vedoucí ke zvyšování výrobní přesnosti a dále můžou být využity pro oblast predikce geometrické / volumetrické a výrobní přesnosti obráběcích strojů na principu popsaném v publikaci [76], [77], [78].

### ***F. Dílčí závěr***

Zlepšení volumetrické přesnosti malého tříosého obráběcího stroje o 70 % se projeví až 58% zlepšením na kruhovitosti bez zatížení měřeném dle ISO 230-4:2005 a dále 40% zlepšením na tvarové přesnosti obrobku (roundness) při podmínkách dokončovacího obrábění.

Z výsledku experimentu je dále patrné, že u chyby kruhovitosti hraje významnou roli chyba kolmosti dvou vzájemných os v rovině obrábění, a to jak u zkoušky kruhové

interpolace dvou lineárních os dle ISO 230-4:2005, tak i s dopadem na chybu kruhovitosti obrobku.

U malého CNC obráběcího stroje, mezi které patří MCV754QUICK, bylo dosaženo 40 % zlepšení chyby kruhovitosti na obrobku díky aktivaci volumetrické kompenzace. Čistá doba měření zde byla 50 min, doba včetně polohování LaserTRACERU a zavádění kompenzací včetně verifikace zařízením Ballbar QC20-w přibližně 125 min. Z pohledu času potřebného pro proměření stroje, zavedení kompenzačních tabulek a verifikace se jedná o vysoce efektivní způsob zvyšování výrobní přesnosti.

Další výzkumná činnost v této oblasti bude zaměřena na ověřování rozměrové přesnosti za různých podmínek obrábění.

Tyto výsledky mají potenciál dále zefektivňovat kompenzace vedoucí ke zvyšování výrobní přesnosti a dále mohou být využity pro oblast predikce geometrické/volumetrické a pracovní přesnosti obráběcích strojů.

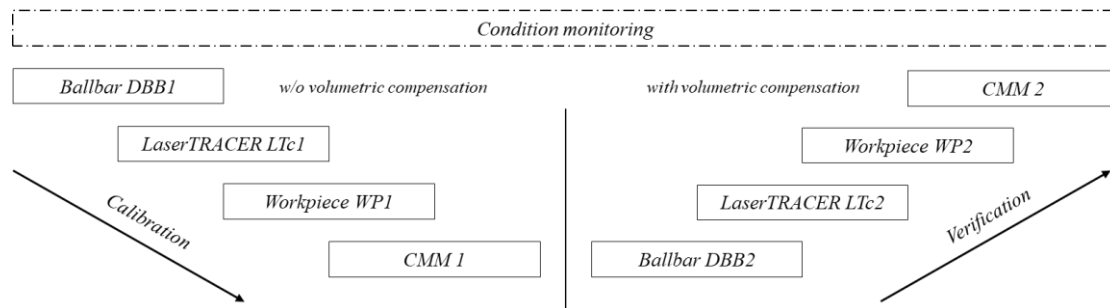
## **5.2.2 Případová studie vlivu volumetrické přesnosti na výsledné pracovní přesnosti obrobku dle ISO 10791-7: 2014**

Případová studie byla zaměřena na ověření závislosti volumetrické přesnosti stroje a pracovní přesnosti. Geometrická přesnost je v tomto případě reprezentována volumetrickou přesností. Měření volumetrické přesnosti je založené na měření nepřímou metodou samonaváděcího laserového interferometru LaserTRACER. Výrobní přesnost je reprezentována na zkušebním obrobku dle ISO 10791-7: 2014. Ta byla následně ověřena na měřicím zařízení ZEISS PRISMO Ultra. Výsledky odchylek tvaru a rozměrů jsou srovnány na obrocích bez aktivovaných kompenzacemi VCSA3 a s aktivovanými kompenzacemi VCSA3 na stroji MCV 754QUICK.

### ***A. Návrh experimentu***

Experiment byl rozdělen do dvou částí (obr. 140), stejně jako v předchozí případové studii. V první části je provedeno měření tříosého obráběcího stroje v jeho základním nastavení pomocí měřicího zařízení Ballbar a LaserTRACER, tj, bez softwarových kompenzací geometrických chyb stroje. V druhém nastavení byla provedena kompenzace volumetrické přesnosti a jsou aktivovány opce VCSA3. V průběhu celého experimentu jsou monitorovány teploty na stroji a jeho okolí.

V obou částech experimentu bylo provedeno měření kruhové interpolace dle ISO 230-4 [29] přístrojem Ballbar QC20-w, RENISHAW pro obrábění bez kompenzací DBB1 a pro obrábění s volumetrickými kompenzacemi DBB2. Následovalo měření volumetrické přesnosti přístrojem LaserTRACER, ETALON ve stavu bez kompenzací LTc1 a s aktivovanými volumetrickými kompenzacemi LTc2. Dalším krokem bylo obrobení zkušební obrobku dle ISO 10791-7 bez softwarových (geometrických) kompenzací WP1 a s aktivovanými volumetrickými kompenzacemi WP2. V posledním kroku každého z cyklu byla provedena kontrola rozměrové a tvarové přesnosti obrobku na přístroji PRISMO Ultra, firmy ZEISS (CMM) opět pro obrobek bez aktivovaných softwarových kompenzací CMM1 a s aktivovanými volumetrickými kompenzacemi CMM2.



obr. 140 Schéma navrženého experimentu

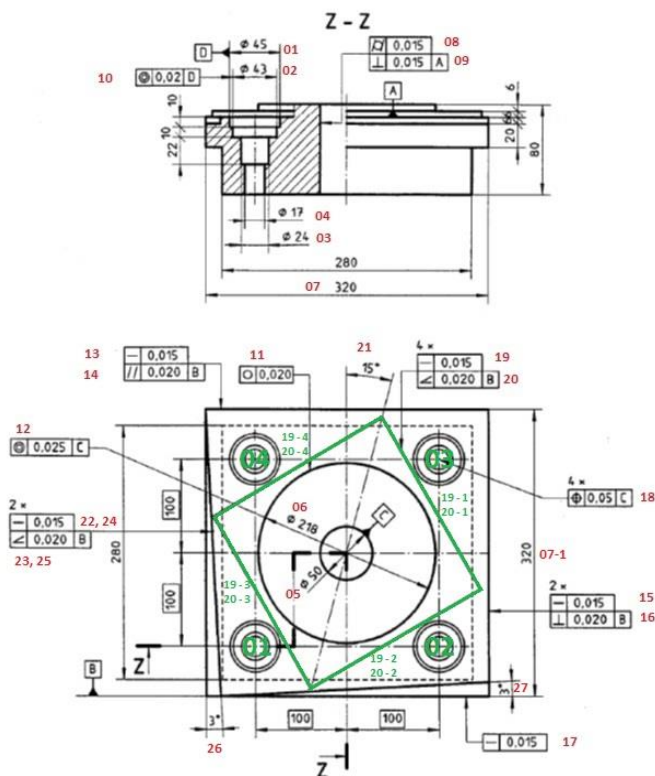
### **B. Umístění obrobku v pracovním prostoru stroje**

Na obr. 141 je zobrazeno umístění a upnutí obrobku v kompenzované části pracovního prostoru obráběcího stroje.



obr. 141 Umístění obrobku v pracovním prostoru stroje

Tvar a rozměry obrobku jsou dány dle normy ISO 10791-7:2014 velikost 320x320 mm a jsou zobrazeny na následujícím obrázku včetně přiřazených označení (01 až 27) kontrolovaných tolerancí na CMM (obr. 142).



obr. 142 Schéma zkušební obrobku včetně označení kontrolovaných míst

### C. Podmínky obrábění

Technologie obrábění, materiál obrobku, poloha obrábění a způsob upnutí byly shodné pro oba zkušební dílce. Parametry obrábění vnějšího rozměru–hrubování jsou popsány v tab. 23.

tab. 23 Podmínky obrábění pro hrubování vnějšího rozměru

Cutting Parametr	Speed	150 m/min
	Feed	0,1 mm/zub
	Depth	3 mm
Cutting tool spec.	Material	AlTiN+TiN
	Type	PVD
	No. of flutes	4
	Diameter	40 mm
	Holder	ISO 40

Parametry obrábění vnitřního rozměru–hrubování jsou popsány v tab. 24.

tab. 24 Podmínky obrábění pro hrubování vnitřního rozměru

Cutting Parametr	Speed	180 m/min
	Feed	0,1 mm/zub
	Depth	3 mm
Cutting tool spec.	Material	AlTiN+TiN
	Type	PVD
	No. of flutes	2
	Diameter	16 mm
	Holder	ISO 40 ER25

Parametry obrábění vnitřního a vnějšího rozměru–dokončování s hloubkou třísky 0,05 mm jsou popsány v tab. 25.

tab. 25 Vnitřní a vnější rozměr – dokončování 0,05 mm

Cutting Parametr	Speed	150 mm/min
	Feed	0,1 mm/zub
	Depth	0,05 mm
	Width	15 mm
Cutting tool spec.	Material	Solid Carbon
	Type	Endmill
	No. of flutes	4
	Diameter	20 mm
	Holder	ISO 40 ER25

Parametry obrábění vnitřního a vnějšího rozměru–dokončování s hloubkou třísky 0,2 mm jsou popsány v tab. 26.

tab. 26 Vnitřní a vnější rozměr – dokončování 0,2 mm

Cutting Parametr	Speed	100 mm/min
	Feed	0,1 mm/zub
	Depth	0,2 mm
	Width	15 mm
Cutting tool spec.	Material	Solid Carbon
	Type	Endmill
	No. of flutes	4
	Diameter	20 mm
	Holder	ISO 40 ER25

## D. Výsledek experimentu

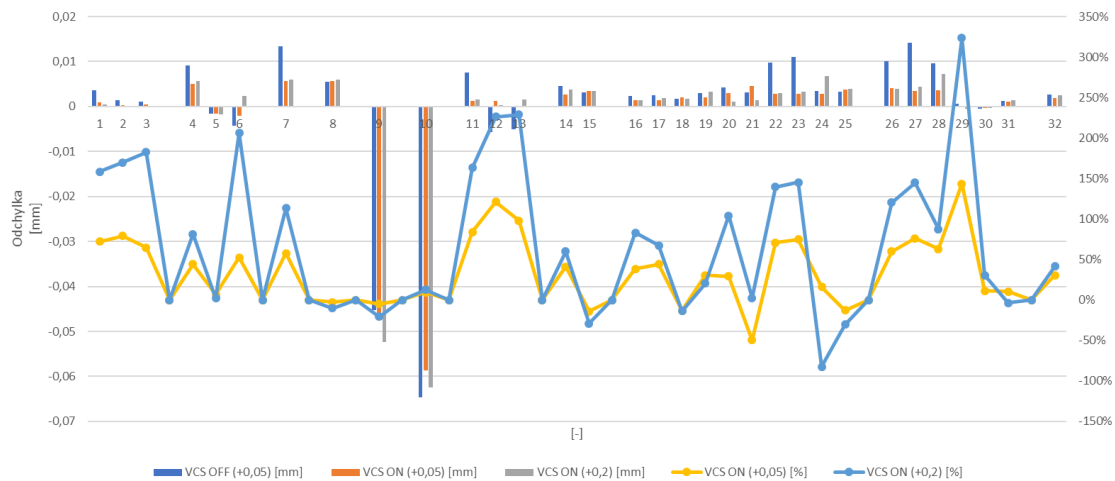
V tab. 27 a obr. 143 jsou patrné výsledky z realizovaných zkoušek pracovní přesnosti stroje MCV75 QUCIK, v.č. 805. Jak je patrné, byly vyhodnoceny převážně geometrické odchylky.

tab. 27 Výsledky naměřených odchylek

Číslo na výkrese	Vnitřní průměr díry	VCS OFF (+0,05)	VCS ON (+0,05)	VCS ON (+0,2)	VCS ON (+0,05)	VCS ON (+0,2)
	<b>Souosost vnitřního průměru k základně D</b>	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[%]
10	1	0,00361360	0,00100690	0,00049470	72%	86%
	2	0,00138440	0,00028900	0,00012870	79%	91%
	3	0,00116100	0,00041230	-0,00021120	64%	118%
	<b>Souosost vnějšího průměru k základně C</b>					
12	4	0,00908320	0,00506730	0,00570740	44%	37%
	5	-0,00163280	-0,00152360	-0,00170890	7%	-5%
	6	-0,00423790	-0,00202430	0,00228540	52%	154%
	<b>Kruhovitost vnějšího průměru</b>					
11	218	0,01331300	0,00561880	0,00590780	58%	56%
	<b>Válcovitost</b>					
8		0,00551640	0,00567410	0,00591540	-3%	-7%
	<b>Délka v ose X</b>					
7	320	-0,04521150	-0,04743220	-0,05244750	-5%	-16%
	<b>Délka v ose Y</b>					
7-1	320	-0,06473060	-0,05867850	-0,06254230	9%	3%
	<b>Kolmost k základně A</b>					
9	11	0,00761600	0,00121980	0,00158710	84%	79%
	12	-0,00571100	0,00121490	0,00029910	121%	105%
	13	-0,00503860	-0,00010950	0,00155860	98%	131%
	<b>Kolmost hrany k základně B</b>					
16	kolmost R	0,00457730	0,00270860	0,00369860	41%	19%
	kolmost L	0,00306460	0,00349370	0,00352210	-14%	-15%
	<b>Průmočarost</b>					
13	Horní hrana	0,00241320	0,00148230	0,00133630	39%	45%
17	Spodní hrana	0,00251480	0,00141070	0,00192520	44%	23%
15	Pravá hrana	0,00173910	0,00196910	0,00175140	-13%	-1%
	Levá hrana	0,00292160	0,00202540	0,00322030	31%	-10%
23	Na zkosené hraně - bok	0,00422800	0,00298510	0,00106930	29%	75%
25	Na zkosené hraně - spodek	0,00307190	0,00460340	0,00146470	-50%	52%
19-1	Hrana 1	0,00974690	0,00282740	0,00304500	71%	69%
19-2	Hrana 2	0,01109910	0,00279750	0,00327540	75%	70%
19-3	Hrana 3	0,00344170	0,00288290	0,00684180	16%	-99%
19-4	Hrana 4	0,00328970	0,00370790	0,00386970	-13%	-18%
	<b>Sklon</b>					
20-1	Hrana 1	0,01013010	0,00407350	0,00397760	60%	61%
20-2	Hrana 2	0,01414170	0,00341140	0,00440180	76%	69%
20-3	Hrana 3	0,00954850	0,00355950	0,00716940	63%	25%
26	Hrana 3° - bok	0,00055890	-0,00024350	-0,00044630	144%	180%
27	Hrana 3° - spodek	-0,00042730	-0,00037920	-0,00034580	11%	19%
21	úhel 15°	0,00118990	0,00106710	0,00135470	10%	-14%
	<b>Rovnoběžnost</b>					
14	Horní hrana se základnou B	0,00274050	0,00190200	0,00243800	31%	11%

Ze 30 kontrolovaných položek došlo při obrábění VCS ON (0,05 mm) ke zlepšení u 26 položek s průměrnou hodnotou zlepšení o 40 %, u obrábění VCS ON (0,05 mm) došlo ke zlepšení 22 položek s průměrnou hodnotou zlepšení o 34 %.





obr. 143 Zobrazení výsledku naměřených rozměrových a tvarových odchylek obrobků

### E. Dílčí závěr

Na základě realizovaných zkoušek lze konstatovat, že pracovní přesnost stroje byla zlepšena nasazením volumetrických kompenzací, a to jak pro dokončovací operaci s hloubkou třísky 0,05 mm, tak pro obrábění s hloubkou třísky 0,2 mm. Je nutné brát v potaz, že kompenzace stroje probíhala v režimu měření teplot z rámu stroje, tedy dle postupu publikovaného v [66].

## 5.3 DÍLČÍ ZÁVĚR

Pokročilé měřicí technologie představují vysoký potenciál pro další zvyšování pracovní přesnosti obráběcích strojů. Jak bylo popsáno v kap. 3, jedná se o obrábění zkušebního obrobku nebo sady zkušebních obrobků. Obrábění zkušební dílce probíhá převážně pod plnou kontrolu výrobce stroje a jeho dodavatelů. Jejich snahou je docílit co nejlepšího nastavení stroje a řezného procesu, ale také zajištění stabilního okolního prostředí, precizně seřízených nástrojů a jiných periférií stroje.

V rámci kapitoly 5 jsou prezentovány dvě případové studie popisující vliv volumetrické přesnosti na pracovní přesnosti. V případě vlivu volumetrické přesnosti na kruhovitost obrobku je patrné, že došlo k výraznému snížení volumetrické chyby ze 49  $\mu\text{m}$  na 14  $\mu\text{m}$ . Dále došlo ke snížení chyb polohování a výraznému snížení chyb kolmosti dvou vzájemných os.

V případě vlivu volumetrické přesnosti na pracovní přesnost se ukazuje, že ze 30 kontrolovaných položek došlo při obrábění VCS ON (0,05 mm) ke zlepšení u 26 položek

s průměrnou hodnotou zlepšení o 40 %, u obrábění VCS ON (0,02 mm) došlo ke zlepšení 22 položek s průměrnou hodnotou zlepšení o 34 %.

## 6 DALŠÍ POSTUPY ZVYŠOVÁNÍ VÝROBNÍ PŘESNOSTI

V této kapitole jsou naznačeny doporučení a trendy dalšího možného výzkumu a vývoje v oblasti zvyšování výrobní přesnosti CNC obráběcích strojů.

### 6.1 DALŠÍ VÝZKUM V OBLASTI ZVYŠOVÁNÍ VÝROBNÍ PŘESNOSTI

Díky postupnému zavádění prvků Industry 4.0 do obráběcích strojů lze očekávat zvyšování znalostní báze o chování stroje a jeho okolí. Využití těchto znalostí je následně uplatnitelné pro predikování rozměrové a tvarové přesnosti obrobků v dynamicky se měnícím výrobním prostředí. Na základě výše uvedených základních požadavcích je postupně budována koncepce digitálního dvojčete CNC obráběcího stroje, který je využíván pro predikování chování stroje. Ve spolupráci s Ústavem matematiky probíhá výzkumná činnost v torbě matematických algoritmů pro zavádění vlastních kompenzací. Aktuální stav spolupráce lze prezentovat společnou publikační činností [79], [80], [81]. Tato spolupráce je dále plánovaná v rámci řešení projektu DMS OP VVV CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_026/0008404 na roky 2020–2022.

V rámci řešených VaV projektů s průmyslovými partnery jsou v přípravě nebo v řešení témata zabývající se popisem chování TCP v pracovním prostoru stroje v závislosti na okolních podmínkách, mezi které patří například teplota okolního vzduchu. Dále na koncepci popisu volumetrické odchylky ve vazbě na digitální dvojče stroje. V neposlední řadě se jedná o zvyšování efektivity měření s cílem snížit výslednou nejistotu měření volumetrické odchylky stroje.

Další oblastí pro interpretaci zdrojů chyb na stroji a ve výrobním procesu je přenos informací do prostředí virtuální reality. Cílem této „aplikace“ je zvýšit schopnost interpretace výrobního procesu z pohledu zdrojů chyb. Tato oblast je rozpracována v rámci výzkumných aktivit:

- digitální dvojče umožní vzdálenou kontrolu pracoviště (rozvíjeno v rámci interního výzkumného záměru ÚVSSR, FSI),
- zvyšování výrobní přesnosti v oblasti velkých obrobků a přesných obráběcích strojů (v rámci výzkumného záměru s průmyslovým partnerem Slovacké strojírny, a. s.).

## 6.2 CÍL DALŠÍHO VÝZKUMU V CHOVÁNÍ VÝROBNÍ PŘESNOSTI

Cílem dalšího výzkumu v oblasti zvyšování výrobní přesnosti je ověření závislosti mezi geometrickou – volumetrickou – pracovní a výrobní přesností pro různé typy a velikosti obráběcích strojů. Tohoto cíle může být dosaženo pouze za předpokladu, že budou uvolněny kapacity různých typů strojů pro pravidelnou kontrolu geometrické, volumetrické a pracovní přesnosti a současně budou kontrolovány na měrovém středisku obrobky z výroby. Z důvodu nestability nastavení výrobního procesu ať z pohledu vnějších či vnitřních zdrojů rušení je dalším úkolem analyzovat a popsat negativní faktory mezi pracovní a výrobní přesností; volumetrickou a výrobní přesností. Při řešení tohoto úkolu je předpokládáno, že obráběcí stroj i celý výrobní proces bude provozován v koncepci Průmyslu 4.0. Právě data získané o vnějším a vnitřním procesu chování budou využita pro zpřesňování odhadu chování vzájemné polohy mezi nástrojem a obrobkem. Výše uvedené postupy povedou ke zvyšování přesnosti výpočtového modelu pro predikci výsledné rozměrové a tvarové přesnosti obrobku zahrnující vybrané vnitřní a vnější negativní faktory.

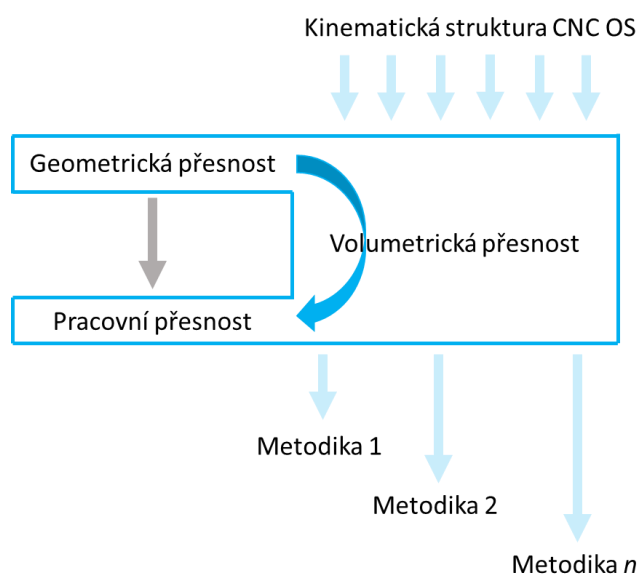
Pro dosažení výše uvedených bodů bude nezbytné neustále rozvíjet oblast volumetrických přesností a cíleně updatovat hardware a software nejen na pracovišti ÚVSSR, ale také u průmyslových partnerů.

## 7 ZHODNOCENÍ PŘEDKLÁDANÉ HABILITAČNÍ PRÁCE

### 7.1 AKTUÁLNOST ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A SHRNUTNÍ PRÁCE

Řešená problematika zvyšování pracovní přesnosti CNC obráběcích strojů je neustále řešena a rozšiřována o neustálý rozvoj vědy a techniky. Jedním z takových inovací jsou volumetrické kompenzace, kde je vysoký potenciál v jejich uplatnění. Aktuálnost řešeného tématu lze posoudit i v nabídce komerčních produktů v oblasti geometrické a volumetrické přesnosti. Jedná se nejen o měřicí techniku, ale i o softwarové řešení a nadstaveb řídicích systémů CNC obráběcích strojů.

Předkládaná vědecká práce se zabývá vývojem metodik s cílem zvýšit pracovní přesnost CNC obráběcích strojů dle obr. 144. Metodika 1 představuje výstup Metodický postup efektivní stavby obráběcích strojů reprezentující tříosou kinematičnou strukturu CNC obráběcích strojů. Metodika 2 představuje potom metodický postup zavádění volumetrických kompenzací pětiosých obráběcích center s kinematičnou „BK“.



obr. 144 Shrnutí habilitační práce

Doba nezbytná pro měření a zavedení kompenzací nemá pouze ekonomické hledisko, ale také musí zvažovat vliv změny okolních podmínek na výslednou hodnotu volumetrické přesnosti. Na základě této skutečnosti bylo posuzováno několik způsobů měření volumetrické přesnosti pomocí samonaváděcího trackovacího interferometru, mezi které patřily časové řízení, pomocí signálu ze stroje a kontinuální (dynamický) způsob měření. Zde se projeví časové úspory 40 až 60 % dle typu připojení měřicího zařízení vůči obráběcímu stroji. V rámci výzkumných aktivit bylo potvrzeno, že výše

uvedené způsoby měření nemají vliv na tvary průběhů a velikosti jednotlivých geometrických chyb stroje.

Dalším úkolem bylo dosáhnout co nejnižší volumetrické chyby tříosého obráběcího stroje. Pro tento případ byly realizovány zkoušky, zahrnující různé strategie kompenzace stroje, při kterých byly navzájem kombinovány konvenční softwarové kompenzace s kompenzacemi volumetrickými. Zde se prokázala skutečnost, že postup zavádění kompenzací má vliv na výslednou velikost volumetrické odchylky. Tyto postupy umožnily další snižování volumetrických chyb do 20 %, ale za cenu zvýšení časové náročnosti měření.

Mezi úkoly efektivního zvyšování volumetrické přesnosti patří oblast aplikace volumetrických kompenzací pouze pro prostor, ve kterém se nachází obrobek. Tento způsob strategie měření byl navržen zejména pro velké obráběcí stroje, kde jsou pojezdy os až 30 000 mm, přičemž využívaný prostor pro finální obrábění je například pouze 8 000 mm. Zbytek prostorou slouží pro přípravu nebo pro obrábění bez vyšších požadavků na rozměrové a tvarové tolerance obrobku. Očekávaný přínos lze pozorovat v času potřebného pro měření pracovního prostoru stroje a dále pro efektivnější využití optimalizace výpočtů kompenzační tabulky. V rámci provedených zkoušek nedošlo ke zlepšení volumetrické přesnosti stroje u malého obráběcího stroje MCV 754 QUICK.

V rámci řešení projektu TAČR vznikla certifikovaná metodika, která byla vyvinuta s průmyslovými partnery TAJMAC-ZPS, a. s., TOS KUŘIM-OS, a. s., TOSHULIN, a. s., SKODA MACHINE TOOL, a. s., a INTEMAC SOLUTIONS, s. r. o. Tato metodika položila základy pro další výzkumné aktivity a na zpracování certifikované metodiky pro pětiosé obráběcí centra s kinematikou BK. Ta vznikla za podpory interního výzkumu na FSI. Nyní je problematika volumetrické přesnosti řešena v rámci projektů TAČR (posouzení okolních vlivů na volumetrickou přesnost víceosých strojů a zvyšování výrobní přesnosti v oblasti velkých obrobků), projektu H2020 (tvorba virtuálního modelu volumetrické přesnosti stroje) a projektu OP VVV se zaměřením na pracovní a výrobní přesnost obráběcích strojů a limitů volumetrických kompenzací.

Zajímavý potenciál představuje znalostní báze o geometrickém/volumetrickém chování stroje pro predikování rozměrových a tvarových chyb obrobků. Je snahou řešitelského kolektivu dále tento směr rozvíjet.

Z výsledků získaných v rámci řešených VaV projektů zejména s průmyslovými partnery se prokázal velký potenciál pro další výzkum v této oblasti. V současné době je

pracoviště ÚVSSR zapojeno do řešení několika výzkumných témat spojených s geometrickou, pracovní a výrobní přesností.

## 7.2 VLASTNÍ PODÍL VĚDECKÉ PRÁCE NA PŘEDKLÁDANÝCH VÝSLEDKÁCH

Předložené vědecké výsledky (2 3 4 5 ) jsou psané převážně formou publikací kolektivu autorů s vlastním komentářem. Publikace zabývající se problematikou geometrické přesnosti, pracovní přesnosti, výrobní přesnosti, volumetrické přesnosti a volumetrické kompenzace jsou majoritně mojí vlastní vědeckou prací. Kolektivní práce spočívala především v řešení specifických úkolů nezbytných pro tvorbu vědeckých prací. Jednalo se zejména o oblasti elektroniky, matematiky, obrábění a řízení.

V oblasti zvyšování přesnosti CNC obráběcích strojů, volumetrické přesnosti a volumetrické kompenzace spolupracuji především s kolegou Ing. Tomášem Markem, Ph.D., u kterého jsem byl veden jako školitel specialista a jehož doktorandská práce byla orientována na přesnost rotačních os CNC obráběcích strojů. S kolegou Ing. Janem Vetiškou, Ph.D. spolupracuji zejména na zvyšování efektivity měření a jeho práce spočívá především v návrhu elektroniky.

Níže je uveden soubor prací, které nejsou výzkumnými zprávami (viz. kap. 3 4 5 ), s autorovým podílem a komentářem k vlastnímu podílu vztahujícímu se k předložené habilitační práci:

- M. Holub, P. Blecha, F. Bradac, and R. Kana, “Volumetric compensation of three axis vertical machining centre,” *MM Sci. J.*, vol. 2015, no. 03, pp. 677–681, Sep. 2015, doi: 10.17973/MMSJ.2015\_10\_201534.
  - *Autorův podíl činní 70 %*
  - CRediT author statement – *Conceptualization, Methodology, Project administration, Visualization, Writing – Original Draft, Investigation, Formal analysis*
- M. Holub, “Geometric Accuracy of Machine Tools,” in *Measurement in Machining and Tribology. Materials Forming, Machining and Tribology*, J. Davim, Ed. Springer, Cham, 2019, pp. 89–112.
  - *Autorův podíl činní 100 %*

- J. Knobloch, M. Holub, and M. Kolouch, “Laser tracker measurement for prediction of workpiece geometric accuracy,” *Eng. Mech.* 2014 - 20th Int. Conf., pp. 296–299, 2014.
  - *Autorův podíl 30 %*
  - CRediT author statement – *Conceptualization, Supervision, Writing – Editing*
- M. Holub, R. Jankovych, O. Andrs, and Z. Kolibal, “Capability assessment of CNC machining centres as measuring devices,” *Measurement*, vol. 118, pp. 52–60, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2018.01.007.
  - *Autorův podíl činní 50 %*
  - CRediT author statement – *Conceptualization, Methodology, Project administration, Visualization, Writing – Original Draft, Investigation, Formal analysis*
- T. Marek, J. Berthold, M. Holub, and J. Regel, “A quasi-online geometric errors compensation method on CNC machine tool,” in *Proceedings of the 2018 18th International Conference on Mechatronics – Mechatronika*, 2018.
  - *Autorův podíl činní 30 %*
  - CRediT author statement – *Conceptualization, Supervision, Writing – Editing*
- M. Holub and J. Knobloch, “Geometric accuracy of CNC machine tools,” in *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics – Mechatronika 2014*, 2014, pp. 260–265, doi: 10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018268.
  - *Autorův podíl činní 60 %*
  - CRediT author statement – *Conceptualization, Methodology, Visualization, Writing – Original Draft, Investigation*
- M. Holub, J. Knobloch, and T. Marek, “A study of application of volumetric compensation by direct and indirect measurement methods,” *MM Sci. J.*, vol. 2019, no. 04, pp. 3035–3040, Nov. 2019, doi: 10.17973/MMSJ.2019\_11\_2019047.
  - *Autorův podíl činní 55 %*
  - CRediT author statement – *Conceptualization, Methodology, Visualization, Writing – Original Draft, Investigation*



- M. Holub, P. Blecha, F. Bradac, T. Marek, and Z. Zak, “Geometric errors compensation of CNC machine tool,” *MM Sci. J.*, vol. 2016, no. DECEMBER, 2016, doi: 10.17973/MMSJ.2016\_12\_2016194.
  - *Autorův podíl činní 75 %*
  - CRediT author statement – *Conceptualization, Methodology, Project administration, Visualization, Writing – Original Draft, Investigation, Formal analysis*
- M. Holub, O. Andrs, J. Kovar, and J. Vetiska, “Effect of position of temperature sensors on the resulting volumetric accuracy of the machine tool,” *Measurement*, p. 107074, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2019.107074.
  - *Autorův podíl činní 60 %*
  - CRediT author statement – *Conceptualization, Methodology, Project administration, Visualization, Writing – Original Draft, Investigation, Formal analysis*
- M. Holub, “Kompenzace geometrické přesnosti CNC obráběcích strojů,” in *Konstrukce CNC obráběcích strojů IV*, MM publishing, s. r. o., 2018.
  - Autorův podíl činní 100 %
- M. Holub, J. Vetiska, F. Bradac, and M. Vala, “Application on-the-fly measurement of CNC machine tools,” *MM Sci. J.*, vol. 2017, no. December, pp. 2085–2089, 2017, doi: 10.17973/MMSJ.2017\_12\_201791.
  - *Autorův podíl činní 65 %*
  - CRediT author statement – *Conceptualization, Methodology, Project administration, Visualization, Writing – Original Draft, Investigation, Formal analysis*
- J. Marek, M. Holub, T. Marek, and P. Blecha, “Geometric Accuracy, Volumetric Accuracy and Compensation of CNC Machine Tools,” in *Machine Tools [Working Title]*, IntechOpen, 2020
  - *Autorův podíl činní 30 %*
  - CRediT author statement –, *Supervision, Writing – Original Draft, Visualization*

- M. Holub et al., “Experimental Study of the Volumetric Error Effect on the Resulting Working Accuracy—Roundness,” Appl. Sci., vol. 10, no. 18, p. 6233, Sep. 2020, doi: 10.3390/app10186233.
  - *Autorův podíl činní 50 %*
  - CRediT author statement – *Conceptualization, Methodology, Project administration, Visualization, Writing – Original Draft, Investigation, Formal analysis*
- Holub, M.; Blecha, P.; Marek, T.; Marek, J.; Bradáč, F.: Certifikát č. 012/2018/TLO; Metodický postup zavádění volumetrických kompenzací pětiosých obráběcích center s kinematikou „BK“. VUT, FSI, Technická 2896/2. (metodika certifikovaná)
  - *Autorův podíl 70 %*
  - CRediT author statement – *Conceptualization, Methodology, Project administration, Visualization, Writing – Original Draft, Investigation, Formal analysis*
- Holub, M.; Vetiška, J.; Knobloch, J.; Minář, P.; Blecha, P.: Certifikát ESOS; Metodický postup efektivní stavby obráběcích strojů. VUT, FSI, Technická 2896/2. (metodika certifikovaná)
  - *Autorův podíl činní 40 %*
  - CRediT author statement – *Conceptualization, Methodology, Project administration, Writing – Original Draft, Formal analysis*

## 7.3 PŘÍNOSY PRÁCE

### 7.3.1 Vědecký a teoretický přínos

Vědecký a teoretický přínos předkládané práce leží v rovině návrhu a ověření metodiky zvyšování volumetrické přesnosti tříosých a pětiosých obráběcích centrech, včetně návrhu metodického postupu ověřování jejich aplikací.

V rámci řešeného tématu byly obhájeny dvě doktorské práce. První pod názvem „Predikce pracovní přesnosti CNC obráběcích strojů“ řešená Ing. Michalem Michalíčkem, Ph.D., obhájená v ak. roce 2012/2013 a druhá práce pod názvem „Predikování vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic obráběcích strojů“ řešená Ing. Tomášem Markem, Ph.D. obhájená v ak. roce 2019/2020, přičemž autor předložené habilitační práce byl veden jako školitel specialista. Další téma doktorské

práce pod názvem „Predikce způsobilosti obráběcího stroje v kontextu průmyslu 4.0“ je ve fázi zpracování, kde je autor předložené práce veden jako školitel specialista a aktuálně je vypsáno nové téma doktorské práce pod názvem „Zavádění inovativních přístupů pro zvyšování výrobní přesnosti CNC obráběcích strojů“, kde by byl autor předložené práce veden jako vedoucí práce.

Výsledky předložené práce jsou prezentovány a publikovány na uznávaných mezinárodních vědeckých konferencích a v časopisech. Většina publikací je indexovaná v databázích SCOPUS a WOS.

Současně jsou řešeny výzkumné záměry s průmyslovými partnery pod programy TA ČR a Horizon 2020 na témata zaměřená na geometrickou, volumetrickou, pracovní a výrobní přesnost CNC obráběcích strojů. Tyto řešené úkoly dále posouvají znalosti řešitelského týmu a více umocňují požadavky na multidisciplinaritu řešení.

V poslední době habilitant působí i jako recenzent impaktovaných časopisů Measurement (Elsevier), Sensors (MDPI), Symmetry (MDPI) a Journal of Manufacturing and Materials Processing (MDPI). Dále je autor členem redakční rady časopisu MM Science Journal a byl členem vědeckého výboru mezinárodní konference HSM 2019 (High Speed Machining) a dále ve vědeckém výboru mezinárodního workshopu QERS.

### **7.3.2 Praktický přínos**

Praktický přínos leží v zavádění pokročilých hardwarových i softwarových technologií do výrobních procesů orientovaných na zvyšování pracovní přesnosti. V rámci řešeného tématu bylo řešeno velké množství průmyslových aplikací zaměřených na diagnostiku geometrických chyb CNC obráběcích strojů a jejich následnou kompenzaci. Jedná se zejména o firmy:

1. Výrobce CNC obráběcích strojů: TOS Čelákovice – Slováké strojírny a. s., TOSHULIN a. s., TOS KUŘIM-OS a. s., TAJMAC-ZPS a. s., FERMAT CZ s. r. o.
2. Výrobce tvářecích strojů: ŽĎAS a. s.
3. Uživatele CNC obráběcích strojů: Slováké strojírny a. s.
4. Dodavatele CNC obráběcích strojů: DMG MORI



Tím byl dán základ pro řešení projektu Využití progresivních technologií pro efektivní stavbu obráběcích strojů v rámci, kterého byla certifikována metodika „Metodický postup efektivní stavby obráběcích strojů“. Na základě vyvinuté metodiky je možné docílit zvýšení volumetrické přesnosti o přibližně 70 %, geometrické chyby reprezentované chybou kruhovitosti o přibližně 50 % a pracovní přesnosti v rozmezí 20–40 %.

### 7.3.3 Pedagogický přínos

Pedagogickým přínosem vývoje těchto technologií na VUT v Brně je zavedení volitelného předmětu „Testování obráběcích strojů“ pro studenty magisterského studia – obor Výrobní stroje, systémy a roboty. Tento předmět je úzce profilován na oblast posuzování a zvyšování geometrické přesnosti CNC obráběcích strojů s přesahem na funkcionality obráběcích strojů a výrobní přesnost.

Nesporným přínosem je vedení bakalářských, diplomových prací, tak jako vypsání doktorských prací. Stejně tak jako vedení přednášek na TU Chemnitz, TU Wien a TU Trnava (STU) zaměřené na geometrickou a volumetrickou přesnost CNC obráběcích strojů.

## 7.4 MOŽNOSTI DALŠÍHO VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ PRÁCE

Výsledky předkládané práce jsou průběžně prezentovány v relevantních časopisech, na mezinárodních vědeckých konferencích a workshopech. Oblast pokročilých softwarových kompenzací vyžaduje v současnosti multidisciplinární přístup. Zde se potom naskytuje oblast rozvoje umělé inteligence, integrace pokročilých senzorických systémů do CNC obráběcích strojů, oblast zpracování velkého množství dat, ale také oblast moderní metrologie, mechatroniky, matematiky, fyziky apod. Dále je nutné umět provést zpětný zásah do obráběcího stroje. Toto propojení oblastí má velký potenciál dále snižovat tolerance předepsaných rozměrů obrobků, ale současně snižovat procento nezpůsobitelných obrobků.

Snahou bude výsledky předložené práce aplikovat na další typy CNC obráběcích strojů a dalších typů provozů a výroby. V současné době byly přijaty projektové žádosti na

vývoj pokročilých metod měření a kompenzace specifických geometrických chyb CNC obráběcích strojů se zvýšenou přesností. V rámci řešení se předpokládá využití IIOT (Industrial internet of things), smart komponent a dalších moderních technologií za účelem zvýšení užitečných vlastností obráběcích strojů s cílem zvýšení konkurenceschopnosti na trhu.

## ZÁVĚR

Pracovní a výrobní přesnost obráběcího stroje patří mezi významné parametry, podle kterého lze srovnávat nejen konkurenční produkty, ale také posoudit budoucí kvalitu výrobního procesu. Je tedy snahou všech výrobců obráběcích strojů zvyšovat pracovní přesnost stávajících i nových obráběcích strojů. K tomuto úkolu lze přistupovat několika způsoby, které se liší především v řešení mechanickém nebo softwarovém a dále, v jaké etapě životního cyklu je zásah realizován. To sebou nese patřičné výhody a nevýhody každého z řešení.

Zvyšování pracovní a výrobní přesnosti řešených v předložené práci pomocí volumetrických kompenzací dochází převážně v etapě životního cyklu provozu stroje. Je ale nutné podotknout, že příprava stroje pro volumetrické kompenzace vzniká již v konstrukci, kdy je nezbytné navrhnout příslušenství stroje tak, aby splňovalo požadavky uvedené v práci.

Ze zkoušek popsanych v jednotlivých případových studiích je zřejmé, že zvyšování volumetrické přesnosti vede ke zvyšování pracovní přesnosti vertikálního obráběcího centra MCV 754 QUICK. Na základě posuzovaných parametrů vztažených ke zkušebnímu obrobku lze předpokládat, že toto zlepšení lze očekávat i u jiných typů obráběcích strojů.

Při zavádění volumetrických kompenzací je nutné přistupovat ke každému typu stroje individuálně, a to na základě typu jeho kinematiky, ale také jeho provozu. Současně byly identifikovány požadavky jak ze strany výrobců obráběcích strojů, tak jejich uživatelů. Jedná se zejména o čas potřebný pro zavedení kompenzací a jejich ověření a dále co největší efekt kompenzace. Na základě těchto požadavků vznikla tato práce, která je zaměřená na efektivitu zavádění volumetrických kompenzací za účelem zvyšování pracovní přesnosti obráběcích strojů.

Závěrem je možné konstatovat, že předložená habilitační práce představuje příspěvek k dané problematice. Jak z předešlých textů vyplynulo, je možné z ní vyvodit další témata pro doktorské a habilitační práce v neposlední řadě též témata pro pokračování výzkumu habilitanta.

## LITERATURA

- [1] R. Ramesh, M. A. Mannan, and A. N. Poo, “Error compensation in machine tools — a review: Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors,” *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, vol. 40, no. 9, pp. 1235–1256, 2000, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00009-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00009-2).
- [2] M. Holub, P. Blecha, F. Bradac, and R. Kana, “VOLUMETRIC COMPENSATION OF THREEAXIS VERTICAL MACHINING CENTRE,” *MM Sci. J.*, vol. 2015, no. 03, pp. 677–681, Sep. 2015, doi: 10.17973/MMSJ.2015\_10\_201534.
- [3] MPO - 71310 - Oddělení strategie S3, “Národní výzkumná a inovační strategie pro inteligentní specializaci České republiky (Národní RIS3 strategie) 2014 – 2020 (aktualizace 2018),” 2019.
- [4] TECHNOLOGICKÁ PLATFORMA STROJÍRENSKÁ VÝROBNÍ TECHNIKA, “IMPLEMENTAČNÍ AKČNÍ PLÁN OBORU STROJÍRENSKÉ VÝROBNÍ TECHNIKY pro období 2020–2025+,” 2019.
- [5] P. Blecha, “Analýza oboru STROJÍRENSKÉ VÝROBNÍ TECHNIKY,” 2019.
- [6] M. Holub, “Geometric Accuracy of Machine Tools,” in *Measurement in Machining and Tribology. Materials Forming, Machining and Tribology*, J. Davim, Ed. Springer, Cham, 2019, pp. 89–112.
- [7] J. Knobloch, M. Holub, and M. Kolouch, “Laser tracker measurement for prediction of workpiece geometric accuracy,” *Eng. Mech. 2014 - 20th Int. Conf.*, pp. 296–299, 2014.
- [8] M. Holub, R. Jankovych, O. Andrs, and Z. Kolibal, “Capability assessment of CNC machining centres as measuring devices,” *Measurement*, vol. 118, pp. 52–60, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2018.01.007.
- [9] T. Marek, J. Berthold, M. Holub, and J. Regel, “A quasi-online geometric errors compensation method on CNC machine tool,” in *Proceedings of the 2018 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika*, 2018.
- [10] J. Marek, M. Holub, T. Marek, and P. Blecha, “Geometric Accuracy, Volumetric Accuracy and Compensation of CNC Machine Tools,” in *Machine Tools [Working Title]*, IntechOpen, 2020.
- [11] R. Janovkych, “Statistical tools in metrology,” 2017.
- [12] J. Marek and et al, *Design of CNC machine tools*, MM Special. MM publishing,

- s. r. o, 2015.
- [13] N. Taniguchi, “Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing,” *CIRP Ann.*, vol. 32, no. 2, pp. 573–582, Jan. 1983, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60185-1.
  - [14] J. Marek and et al, *Design of CNC machine tools IV*. MM publishing, s.r.o., 2018.
  - [15] A. Hirsch, *Werkzeugmaschinen - Grundlagen, Auslegung, Ausführungsbeispiele*. Springer, 2012.
  - [16] G. Schlesinger, *Prüfbuch für Werkzeugmaschinen : (die Arbeitsgenauigkeit der Werkzeugmaschinen)*, 8th ed. den Boer, 1970.
  - [17] M. Holub, M. Michalíček, J. Vetiška, and J. Marek, “Prediction of machining accuracy for vertical lathes,” in *Mechatronics 2013: Recent Technological and Scientific Advances*, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-02294-9-6.
  - [18] S. Liang and A. J. Shih, *Analysis of Machining and Machine Tools*. Boston, MA: Springer US, 2016.
  - [19] J. Marek and P. Blecha, “Compensation of axes at vertical lathes,” in *Recent Advances in Mechatronics 2008-2009*, 2009, pp. 371–376.
  - [20] S. Ibaraki and W. Knapp, “Indirect Measurement of Volumetric Accuracy for Three-Axis and Five-Axis Machine Tools: A Review,” *Int. J. Autom. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 110–124, Mar. 2012, doi: 10.20965/ijat.2012.p0110.
  - [21] “ISO 230-6:2002, Test code for machine tools -- Part 6: Determination of positioning accuracy on body and face diagonals (Diagonal displacement tests),” 2002.
  - [22] K. G. Ahn and D. W. Cho, “An analysis of the volumetric error uncertainty of a three-axis machine tool by beta distribution,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 40, no. 15, pp. 2235–2248, Dec. 2000, doi: 10.1016/S0890-6955(00)00048-1.
  - [23] R. Ramesh, M. . Mannan, and A. . Poo, “Error compensation in machine tools — a review,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 40, no. 9, pp. 1235–1256, Jul. 2002, doi: 10.1016/s0890-6955(00)00009-2.
  - [24] S. Ibaraki, M. Sawada, A. Matsubara, and T. Matsushita, “Machining tests to identify kinematic errors on five-axis machine tools,” *Precis. Eng.*, vol. 34, no. 3, pp. 387–398, Jul. 2010, doi: 10.1016/J.PRECISIONENG.2009.09.007.
  - [25] T. Marek and J. Marek, *Having a probe is not enough*. RENISHAW, 2017.
  - [26] H. Schwenke, U. Neuschaefer-Rube, T. Pfeifer, and H. Kunzmann, “Optical



- Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering,” *CIRP Ann.*, vol. 51, no. 2, pp. 685–699, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61707-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61707-7).
- [27] S. Osawa, K. Busch, M. Franke, and H. Schwenke, “Multiple orientation technique for the calibration of cylindrical workpieces on CMMs,” *Precis. Eng.*, vol. 29, no. 1, pp. 56–64, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2004.04.006>.
- [28] H. Kunzmann, T. Pfeifer, R. Schmitt, H. Schwenke, and A. Weckenmann, “Productive Metrology - Adding Value to Manufacture,” *CIRP Ann.*, vol. 54, no. 2, pp. 155–168, 2005, doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60024-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60024-9).
- [29] H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckenmann, R. Schmitt, and F. Delbressine, “Geometric error measurement and compensation of machines—An update,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 57, no. 2, pp. 660–675, Jan. 2008, doi: [10.1016/j.cirp.2008.09.008](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.008).
- [30] H. Schwenke, R. Schmitt, P. Jatzkowski, and C. Warmann, “On-the-fly calibration of linear and rotary axes of machine tools and CMMs using a tracking interferometer,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 58, no. 1, pp. 477–480, 2009, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.007>.
- [31] J.-M. Linares *et al.*, “Impact of measurement procedure when error mapping and compensating a small CNC machine using a multilateration laser interferometer,” *Precis. Eng.*, vol. 38, no. 3, pp. 578–588, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.02.008>.
- [32] G. H. J. Florussen and H. A. M. Spaan, “Dynamic R-Test for Rotary Tables on 5-Axes Machine Tools,” *Procedia CIRP*, vol. 1, pp. 536–539, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.095>.
- [33] G. H. J. Florussen, H. A. M. Spaan, and T. M. Spaan-Burke, “Assessing the Accuracy of Five Axis Machines by Comparing Machine Measurement Data with Test Work Piece Deviations,” *Procedia Manuf.*, vol. 6, pp. 25–32, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.11.004>.
- [34] G. H. J. Florussen, H. A. M. Spaan, and T. M. Spaan-Burke, “Verifying the accuracy of five-axis machine tool focused on kinematic ISO tests using a torus-shaped test work piece,” *Procedia Manuf.*, vol. 14, pp. 58–65, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.11.007>.
- [35] R. H. Schmitt *et al.*, “Advances in Large-Scale Metrology – Review and future

- trends,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 2, pp. 643–665, 2016, doi: 10.1016/j.cirp.2016.05.002.
- [36] R. Schmitt and M. Peterek, “Traceable Measurements on Machine Tools - Thermal Influences on Machine Tool Structure and Measurement Uncertainty,” *Procedia CIRP*, vol. 33, pp. 576–580, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.PROCIR.2015.06.087.
- [37] H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckenmann, R. Schmitt, and F. Delbressine, “Geometric error measurement and compensation of machines—An update,” *CIRP Ann.*, vol. 57, no. 2, pp. 660–675, Jan. 2008, doi: 10.1016/J.CIRP.2008.09.008.
- [38] L. Uriarte *et al.*, “Machine tools for large parts,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, no. 0, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.009>.
- [39] X. Thiem, B. Kauschinger, and S. Ihlenfeldt, “Online correction of thermal errors based on a structure model,” *Int. J. Mechatronics Manuf. Syst.*, vol. 12, no. 1, p. 49, 2019, doi: 10.1504/IJMMS.2019.097852.
- [40] S. Ihlenfeldt, A. Hellmich, and X. Thiem, “Self-optimizing thermal correction,” 2017.
- [41] U. Mutilba, E. Gomez-Acedo, A. Sandá, I. Vega, and J. A. Yagüe-Fabra, “Uncertainty assessment for on-machine tool measurement: An alternative approach to the ISO 15530-3 technical specification,” *Precis. Eng.*, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.PRECISIONENG.2019.03.005.
- [42] U. Mutilba, A. Sandá, I. Vega, E. Gomez-Acedo, I. Bengoetxea, and J. A. Y. Fabra, “Traceability of on-machine tool measurement: Uncertainty budget assessment on shop floor conditions,” *Measurement*, vol. 135, pp. 180–188, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.11.042>.
- [43] U. Mutilba, J. A. Yagüe-Fabra, E. Gomez-Acedo, G. Kortaberria, and A. Olarra, “Integrated multilateration for machine tool automatic verification,” *CIRP Ann.*, vol. 67, no. 1, pp. 555–558, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.008>.
- [44] S. Aguado, D. Samper, J. Santolaria, and J. J. Aguilar, “Machine Tool Rotary Axis Compensation Through Volumetric Verification Using Laser Tracker,” *Procedia Eng.*, vol. 63, pp. 582–590, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.PROENG.2013.08.189.
- [45] S. Aguado, D. Samper, J. Santolaria, and J. J. Aguilar, “Identification strategy of error parameter in volumetric error compensation of machine tool based on laser tracker measurements,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 53, no. 1, pp. 160–169,

- Feb. 2012, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.11.004>.
- [46] S. Aguado, J. Santolaria, D. Samper, and J. J. Aguilar, “Influence of measurement noise and laser arrangement on measurement uncertainty of laser tracker multilateration in machine tool volumetric verification,” *Precision Engineering*, vol. 37, pp. 929–943, 2013, doi: 10.1016/j.precisioneng.2013.03.006.
- [47] S. Aguado, J. Santolaria, D. Samper, J. J. Aguilar, and J. Velázquez, “Improving a real milling machine accuracy through an indirect measurement of its geometric errors,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 40, pp. 26–36, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.05.006>.
- [48] S. Ibaraki, C. Oyama, and H. Otsubo, “Construction of an error map of rotary axes on a five-axis machining center by static R-test,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 51, no. 3, pp. 190–200, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2010.11.011.
- [49] J. Guo, A. Beaucamp, and S. Ibaraki, “Virtual pivot alignment method and its influence to profile error in bonnet polishing,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 122, pp. 18–31, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.IJMACHTOOLS.2017.06.001.
- [50] S. Ibaraki, P. Blaser, M. Shimoike, N. Takayama, M. Nakaminami, and Y. Ido, “Measurement of thermal influence on a two-dimensional motion trajectory using a tracking interferometer,” *CIRP Ann.*, vol. 65, no. 1, pp. 483–486, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.CIRP.2016.04.067.
- [51] S. Ibaraki, G. Sato, and K. Takeuchi, “‘Open-loop’ tracking interferometer for machine tool volumetric error measurement—Two-dimensional case,” *Precis. Eng.*, vol. 38, no. 3, pp. 666–672, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.precisioneng.2014.03.004.
- [52] A. Nafi, J. R. R. Mayer, and A. Wozniak, “Novel CMM-based implementation of the multi-step method for the separation of machine and probe errors,” *Precis. Eng.*, vol. 35, no. 2, pp. 318–328, Apr. 2011, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2010.11.007>.
- [53] T. Erkan, J. R. R. Mayer, and Y. Dupont, “Volumetric distortion assessment of a five-axis machine by probing a 3D reconfigurable uncalibrated master ball artefact,” *Precis. Eng.*, vol. 35, no. 1, pp. 116–125, Jan. 2011, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2010.08.003>.
- [54] T. Erkan, J. R. R. Mayer, and Y. Dupont, “Volumetric distortion assessment of a five-axis machine by probing a 3D reconfigurable uncalibrated master ball

- artefact,” *Precis. Eng.*, vol. 35, no. 1, pp. 116–125, Jan. 2011, doi: 10.1016/J.PRECISIONENG.2010.08.003.
- [55] M. Givi and J. R. R. Mayer, “Validation of volumetric error compensation for a five-axis machine using surface mismatch producing tests and on-machine touch probing,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 87, pp. 89–95, Dec. 2014, doi: 10.1016/J.IJMACHTOOLS.2014.08.001.
- [56] M. Holub and J. Knobloch, “Geometric accuracy of CNC machine tools,” in *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2014*, 2014, pp. 260–265, doi: 10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018268.
- [57] M. Holub, J. Knobloch, and T. Marek, “A STUDY OF THE APPLICATION OF VOLUMETRIC COMPENSATION BY DIRECT AND INDIRECT MEASUREMENT METHODS,” *MM Sci. J.*, vol. 2019, no. 04, pp. 3035–3040, Nov. 2019, doi: 10.17973/MMSJ.2019\_11\_2019047.
- [58] S. Ibaraki and T. Hata, “A new formulation of laser step diagonal measurement—Three-dimensional case,” *Precis. Eng.*, vol. 34, no. 3, pp. 516–525, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2010.02.004>.
- [59] S. Ibaraki, M. Sawada, A. Matsubara, and T. Matsushita, “Machining tests to identify kinematic errors on five-axis machine tools,” *Precis. Eng.*, vol. 34, no. 3, pp. 387–398, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2009.09.007>.
- [60] T. Liebrich, B. Bringmann, and W. Knapp, “Calibration of a 3D-ball plate,” *Precis. Eng.*, vol. 33, no. 1, pp. 1–6, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.02.003>.
- [61] IBSPE, “Rotary analyser,” 2019.
- [62] M. Holub, P. Blecha, F. Bradac, T. Marek, and Z. Zak, “Geometric errors compensation of CNC machine tool,” *MM Sci. J.*, vol. 2016, no. DECEMBER, pp. 1602–1607, 2016, doi: 10.17973/MMSJ.2016\_12\_2016194.
- [63] M. Holub, J. Knobloch, and J. Pernikar, “GTS - Test code for machine tools,” 2015.
- [64] O. Svoboda, “Přesnost frézovacích center při tepelně neustálených stavech,” 2007.
- [65] M. Morávek, “Výzkum přesnosti pětiosých frézovacích center,” 2018.
- [66] M. Holub, O. Andrs, J. Kovar, and J. Vetiska, “Effect of position of temperature sensors on the resulting volumetric accuracy of the machine tool,” *Measurement*,

- p. 107074, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2019.107074.
- [67] M. Holub, “Kompenzace geometrické přesnosti CNC obráběcích strojů,” in *Konstrukce CNC obráběcích strojů IV*, MM publishing, s.r.o., 2018.
- [68] M. Weck and C. Brecher, *Werkzeugmaschinen- Messtechnische untersuchung und Beurteilung. dynamische Stabilitaet*, 7th ed. Berlin: Springer, 2006.
- [69] Siemens AG, “Firemní literatura, prospekty,” 2018.
- [70] Siemens AG, “DOConCD Sinumerik v4.7 SP2 01/2016,” 2016.
- [71] M. Holub, J. Vetiska, F. Bradac, and M. Vala, “Application on-the-fly measurement of CNC machine tools,” *MM Sci. J.*, vol. 2017, no. December, pp. 2085–2089, 2017, doi: 10.17973/MMSJ.2017\_12\_201791.
- [72] M. Holub, P. Blecha, F. Bradac, T. Marek, and Z. Zak, “Geometric errors compensation of CNC machine tool,” *MM Sci. J.*, vol. 2016, no. DECEMBER, 2016, doi: 10.17973/MMSJ.2016\_12\_2016194.
- [73] M. Holub *et al.*, “Experimental Study of the Volumetric Error Effect on the Resulting Working Accuracy—Roundness,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 18, p. 6233, Sep. 2020, doi: 10.3390/app10186233.
- [74] J. Hrdina, P. Vasik, and M. Holub, “DUAL NUMBERS ARITHMETIC IN MULTI AXIS MACHINE ERROR MODELING,” *MM Sci. J.*, vol. 2017, no. 01, pp. 1769–1772, Feb. 2017, doi: 10.17973/MMSJ.2017\_02\_2016210.
- [75] D. MORI, “DMU 75 MonoBlock.”
- [76] M. Armendia *et al.*, “Machine Tool: From the Digital Twin to the Cyber-Physical Systems,” in *Twin-Control*, Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 3–21.
- [77] P. Blecha, N. Durakbasa, and M. Holub, “Digitized Production – Its Potentials and Hazards,” in *Proceedings of the International Symposium for Production Research 2018*, Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 402–411.
- [78] M. Holub, Z. Tuma, J. Kroupa, J. Kovar, and P. Blecha, “Case Study of Digitization of the Production Cell,” *Lect. Notes Mech. Eng.*, pp. 253–262, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-31343-2\_22.
- [79] M. Holub, J. Hrdina, P. Vašík, and J. Vetiška, “Three-axes error modeling based on second order dual numbers,” *J. Math. Ind.*, vol. 5, no. 1, 2015, doi: 10.1186/s13362-015-0016-y.
- [80] B. Navratilova and J. Hrdina, “Multilateration in volumetry: Case study on

demonstrator MCV 754 quick,” in *Mendel*, 2016, pp. 295–300.

- [81] J. Hrdina, P. Vasik, and M. Holub, “Dual numbers arithmetic in multi axis machine error modeling,” *MM Sci. J.*, vol. 2017, no. FEBRUARY, 2017, doi: 10.17973/MMSJ.2017\_02\_2016210.

## **SEZNAM PŘÍLOH**

**PŘÍLOHA 1 - CERTIFIKÁT METODIKY – METODICKÝ POSTUP  
EFEKTIVNÍ STAVBY OBRÁBĚCÍCH STROJŮ**

**PŘÍLOHA 2 - CERTIFIKÁT METODIKY – METODICKÝ POSTUP  
ZAVÁDĚNÍ VOLUMETRICKÝCH KOMPENZACÍ PĚTIOSÝCH  
OBRÁBĚCÍCH CENTER S KINEMATIKAU „BK“**

**Příloha 1: Certifikát metodiky – Metodický postup efektivní stavby obráběcích strojů**



Strojírenský zkušební ústav, s.p.  
TI - technická inspekce  
Hudcova 424/56b, 621 00 Brno

tel: 541 120 111      fax: 541 211 225

VYDÁVÁ

# CERTIFIKÁT

## č. 1201/2017

### Metodický postup efektivní stavby obráběcích strojů

Identifikační číslo: TA04011406 ze dne 2017-09-13  
Druh zprávy: konečná

Projekt  
Využití progresivních technologií pro efektivní stavbu obráběcích strojů (2014-2017, TA0/TA)

Zadavatel  
TA – Podpora aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje „ALFA“ČR

Vypracoval  
Vysoké učení technické – Fakulta strojního inženýrství

Vedoucí projektu  
VUT v Brně  
doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

Autoři  
VUT v Brně  
Ing. Michal Holub, Ph.D.

VUT v Brně  
Ing. Jan Veliška, Ph.D.

Intermac Solutions, s.r.o.  
Ing. Josef Knobloch, MSc.

Intermac Solutions, s.r.o.  
Ing. Petr Minář, MSc.

Řešitelé – další účastníci projektu  
Intermac Solutions, s.r.o.  
Ing. Radomír Zbožíněk

TAJMAC-ZPS, a.s.  
Ing. Radomír Zbožíněk

TOSHULIN, a.s.  
Ing. Vojtěch Frkal

ŠKODA MACHINE TOOL, a.s.  
Ing. Vlastimil Hlavatý

TOS KUŘIM-OS, a.s.  
Ing. Jiří Kachlík

V Brně dne 21. září 2017



Ing. Tomáš Hruška  
ředitel



Strojírenský zkušební ústav, s.p., Hudcova 424/56b, 621 00 Brno, Česká republika  
Engineering Test Institute, public enterprise, Hudcova 424/56b, 621 00 Brno, Czech Republic

[www.szutest.cz](http://www.szutest.cz)



**Příloha 2: Certifikát metodiky – Metodický postup zavádění volumetrických kompenzací pětiosých obráběcích center s kinematikou „BK“**



**TECHNICKÉ LABORATOŘE OPAVA**  
akciová společnost  
Těšínská 2962/79b, 746 01 Opava  
Technická inspekce  
Okružní 834/29a, 638 00 Brno

**VYDÁVÁ**  
**CERTIFIKÁT**  
Č. 012/2018/TLO

**Metodický postup zavádění volumetrických kompenzací  
5ti osých obráběcích center s kinematikou „BK“**

Identifikační číslo: FSI – S – 17 – 4477  
Datum vydání zprávy: 2018-08-30  
Číslo zprávy: Z-18-018  
Druh zprávy: konečná

Projekt:  
Specifický výzkum 2017 – Zvyšování technické vyspělosti výrobních strojů a zařízení

Zadavatel:  
Vysoké učení technické v Brně

Vypracoval:  
Vysoké učení technické – Fakulta strojního inženýrství

Vedoucí projektu:  
VUT v Brně  
Ing. František Bradáč, Ph.D.

Autoři:  
VUT v Brně  
Ing. Michal Holub, Ph.D.

VUT v Brně  
Ing. Tomáš Marek

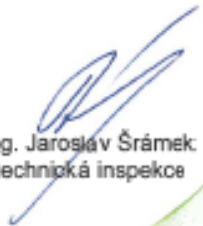
VUT v Brně  
Prof. Ing. Jiří Marek, Dr.

VUT v Brně  
Doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

VUT v Brně  
Ing. František Bradáč, Ph.D.

V Brně dne 3. září 2018:



  
Ing. Jaroslav Šrámek  
technická inspekce