

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

Výzkum přesnosti pětiosých frézovacích center

Ing. Martin Morávek

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Školitel: *doc. Ing. Pavel Bach, CSc.*

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

leden 2018

Název anglicky: Research of the accuracy of five-axis milling centers

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Ústavu výrobních strojů a zařízení Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Martin Morávek

Ústav výrobních strojů a zařízení, Fakulta strojní ČVUT v Praze
m.moravek@rcmt.cvut.cz

Školitel: doc. Ing. Pavel Bach, CSc.

Ústav výrobních strojů a zařízení, Fakulta strojní ČVUT v Praze
p.bach@rcmt.cvut.cz

Školitel-specialista: Ing. Otakar Horejš, Ph.D.

Ústav výrobních strojů a zařízení, Fakulta strojní ČVUT v Praze
o.horejs@rcmt.cvut.cz

Oponenti:

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod.

v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Konstrukční a procesní inženýrství.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

Prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

předseda oborové rady oboru Konstrukční a procesní inženýrství
Fakulta strojní ČVUT v Praze

Obsah

1. Úvod	7
2. Současný stav řešené problematiky	9
3. Cíle disertační práce	13
4. Vývoj metody pro testování volumetrické přesnosti pětiosých frézovacích center	15
4.1. Upevnění aparatury na stroj pomocí termostabilních přípravků	15
4.2. Vřetenový přípravek	16
4.3. Artefakt	16
4.4. Termostabilní modulární rám	17
5. Aplikace navržené metody na měření změny volumetrické přesnosti při teplotně neustáleném stavu obráběcího stroje	19
6. Postup pro měření a vyhodnocení souboru geometrických odchylek	25
6.1. Odchytky pozice a orientace středů otáčení rotačních os	26
6.2. Odchytky vzájemné kolmosti lineárních os	27
7. Ověření navrženého postupu měření a vyhodnocení souboru geometrických odchylek	29
7.1. Vyhodnocení vybraných geometrických odchylek	29
7.2. Vliv vyhodnocených geometrických odchylek na volumetrickou přesnost obráběcího stroje	30
7.3. Porovnání vyhodnocených geometrických odchylek s konvenčním měřením	31
8. Závěr	35
8.1. Přínos disertační práce	35
8.2. Zhodnocení dosažení cílů disertační práce	35

8.3. Možnosti dalšího vývoje řešené problematiky.....	37
Použitá literatura	39
Anotace.....	43
Summary.....	43

1. Úvod

Rostoucí požadavky na geometrickou přesnost a tvarovou složitost obrobků spolu s neutichající snahou o snižování výrobních časů a nákladů způsobují neustálé posilování pozice pětiosých frézovacích center na poli obráběcích strojů.

První pětiosá obráběcí centra se vyvinula z tříosých frézovacích strojů přidáním dvou rotačních os ke třem stávajícím lineárním osám. Drtivá většina pětiosých frézovacích strojů disponuje třemi posuvovými a dvěma rotačními osami. Kombinace tří translačních a dvou rotačních os představuje maximální flexibilitu relativního polohování nástroje vůči obrobku. Strojní osy jsou pak umístěny v nástrojové nebo obrobkové větvi v různém pořadí. V současnosti se vyskytující pětiosé frézovací stroje lze rozdělit do tří kategorií podle uspořádání rotačních a translačních os:

- obrobek je upnut na pevném stole (případně pojíždí ve směru jedné lineární osy) a všechny strojní osy pohybují nástrojem;
- lineární osy jsou v nástrojové větvi a rotační osy ve větvi obrobkové;
- kombinace prvních dvou bodů, kdy je jedna rotační osa v nástrojové a druhá v obrobkové větvi.

Bohez [1] uvádí, že nejčastěji je užíváno prvních dvou případů a to s ohledem na velikost obrobku a způsob obrábění. První skupina je užívána především pro obrábění hmotných a rozměrných obrobků. Nevýhodou tohoto uspořádání je však dlouhý kinematický řetězec, snižující tuhost celého mechanismu. Druhá skupina je oproti tomu využívána pro menší obrobky a lze jí obecně považovat za nejrozšířenější. Abbaszadeh-Mir a kolektiv [2] uvádějí jako hlavní výhody pětiosých frézovacích strojů především:

- dobré geometrické ustavení polohy nástroje vůči povrchu obrobku;
- technicky správné nastavení nástroje podél řezné dráhy;
- malé množství přípravků, upínek a především možnost komplexního obrobení tvarově složitého dílce na jedno upnutí.

Zargarbashi a Mayer [3] však upozorňují, že pětiosé stroje jsou náchylnější na přesnost práce díky složitější kinematické struktuře a náročnějšímu řízení součinnosti pohonů strojních os. Proto je třeba vyvíjet prostředky schopné vlastnosti pětiosých frézovacích strojů komplexně a efektivně měřit, generovat data pro jejich diagnostiku a kompenzaci a dosáhnout tak vyšší přesnosti práce. Florussen a kolektiv [4] jmenují hlavní faktory ovlivňující přesnost práce obráběcích strojů a dělí je do čtyř kategorií:

- geometrické chyby komponent strojních os;
- konečné tuhosti strukturálních smyček při statickém zatížení;
- deformace komponent stroje způsobené změnou teploty;
- dynamické vlastnosti stroje.

Autoři [4] dále uvádějí, že první tři skupiny jsou takzvané kvazistatické zdroje chyb. Definují se jako zdroje způsobující chybu relativní polohy nástroje vůči obrobku. Týkají se samotné struktury stroje a ve výsledku tvoří více jak 70% celkové pracovní přesnosti stroje. Tuto skutečnost potvrzují i autoři Andolfatta, Lavernha a Mayera [5]. Zásadní vliv na výslednou volumetrickou chybu lze tedy přisoudit geometrickým chybám. Volumetrická chyba představuje výslednou odchylku nastavení relativní polohy nástroje vůči obrobku. Schwenke, Knapp a kolektiv [6] uvádějí dvě metody získání hodnot volumetrické chyby:

- měří se jednotlivé geometrické chyby a pomocí matematického modelu stroje je vypočtena chyba volumetrická;
- volumetrická chyba je přímo měřena v konkrétních bodech pracovního prostoru stroje. Vznikne tak jakási prostorová síť bodů se známou volumetrickou chybou.

Obě metody komentují i Ramu, Yagüe, Hocken a Miller [7]. Podle autorů se přímé měření volumetrické chyby značně komplikuje v okamžiku, kdy stroj disponuje nejen lineárními, ale i rotačními osami. Bohez [1] definuje pracovní prostor pětiosého frézovacího stroje jako množinu bodů, do kterých může být nástroj polohován relativně vůči obrobku v rámci rozsahu pojezdu jednotlivých os. Rozsah pojezdů jednotlivých os je limitován rohy pětirozměrné hyperkrychle. Jako možná alternativa se nabízí právě výpočet volumetrické chyby pomocí matematického modelu stroje. Parametrické nebo jednotlivé geometrické chyby strojních os se stanoví jako funkce souřadnice strojních os a využijí se pro výpočet volumetrické chyby v programované poloze.

2. Současný stav řešené problematiky

Souhrnná kritická rešerše je zaměřena na problematiku volumetrické přesnosti pětiosých frézovacích strojů. Prostor je věnován metodám měření přesnosti obráběcích strojů, výpočetním modelům pro stanovení volumetrické chyby a způsobům její kompenzace. Rovněž jsou prostudovány příslušné standardy zabývající se přesností obráběcích strojů. Zásadní vliv na výslednou přesnost práce obráběcího stroje má jeho chování při teplotně neustáleném stavu.

Provedená rešerše jasně naznačuje, že témata zde uvedená jsou aktuálním předmětem zájmu předních výzkumných institucí. Je ovšem patrný i rostoucí zájem nejen výrobců, ale i koncových uživatelů obráběcích strojů. Činitelem je sílící pozice vícesošých obráběcích center na poli výrobních strojů.

V úvodu práce jsou stručně uvedeny typy pětiosých frézovacích center a jejich vlastnosti. Autoři prostudované literatury se shodují, že složitější kinematika pětiosých strojů oproti tříšosým strojům přináší řadu problémů spojených s přesností práce stroje. Z výčtu faktorů ovlivňujících výslednou přesnost práce obráběcího stroje jsou nejvýznamnější geometrické odchylky. Tvoří okolo 70% výsledné odchylky nástroje vůči obrobku. Tento fakt je jasným ukazatelem, že daná problematika je aktuální a nabízí prostor k pokračujícímu výzkumu.

Studium příslušných norem souvisejících s přesností práce pětiosých strojů ukázalo, že normy této problematice věnují jen velmi malou část svého obsahu. Soubor norem ISO 230 shrnující předpisy pro testy obráběcích strojů krátce pojednává o měření geometrických chyb rotačních os v části 1, stručný komentář je věnován přesnosti polohování rotačních os v části 2. Část ISO 230-7 [8] je celá věnována geometrické přesnosti rotačních os. Norma ISO 10791 je specializovaná na testy obráběcích center. Některé její části jsou věnovány univerzálním frézovacím hlavám s jednou nebo dvěma rotačními osami. Asi nejzajímavější je část ISO 10791-6 [9] zabývající se mimo jiné přesností interpolace tří a pěti číslíkově řízených os. Je tedy jedinou normou věnovanou volumetrické přesnosti pětiosých frézovacích center. Nutno však podotknout, že celé problematice se norma věnuje jen okrajově. Jedinou známou normou definující zkušební obrobek pro testování přesnosti pětiosého obráběcího stroje je NAS 979 [10]. Jedná se o obrobek ve tvaru komolého kužele, zvaný též „cone frustum“.

Jisté zlepšení obsahu norem v souvislosti s výše popsanou problematikou představuje nové vydání normy ISO 230-1 [11]. Norma věnuje větší pozornost měření geometrických odchylek rotačních os a to nejen vřetenům, ale i otočným frézovacím hlavám, kolébkám a otočným stolům. Dále norma uvádí metody měření statické tuhosti na strojích s rotačními osami a měření geometrických odchylek vzájemné polohy lineárních a rotačních os. Jedna z kapitol je rovněž věnována kinematickému testování pohybů stroje interpolovaných pomocí dvou, tří a pěti souvisle řízených strojních os. Lze tedy očekávat rozšíření i dalších částí souboru

norem ISO 230 (ale i dalších norem týkajících se obráběcích strojů) v oblasti víceosého obrábění.

Měření přesnosti obráběcích strojů v současné době nabízí dva možné přístupy. Klasické konvenční měřicí metody, kdy ve většině případů jedním měřením dostaneme jeden parametr či odchylku. Druhým přístupem představují moderní metody, využívající sofistikovaných elektronických zařízení s rozsáhlou softwarovou podporou. I přes značnou časovou náročnost oproti moderním metodám jsou klasické metody stále poměrně hojně využívány. Jejich výhoda tkví právě v jednoduchosti. Měření jedné geometrické odchylky zpravidla neovlivňují ostatní geometrické odchylky. Navíc v případě, kdy se zajímáme pouze o konkrétní geometrickou odchylku, je takové měření naprosto postačující a mnohdy i nejvýhodnější. Moderní měřicí metody jsou oproti tomu založeny na principu, z jednoho měření vyhodnotit maximální možný počet odchylek a tím minimalizovat čas potřebný pro měření. Velkou výhodou moderních měřících metod je tedy jejich rychlost, nenáročnost ustavování a jistá míra komfortu pro obsluhu. Výsledkem měření mnohdy bývá kompenzační soubor, přímo aplikovatelný do řídicího systému stroje. Kompletní kalibrace stroje tak může být provedena v čase okolo dvou hodin.

Metody měření na principu „Chase the ball“, měření BallBarem, Laserferometrické metody, ale i metody využívající speciálních artefaktů jsou schopné za jistých okolností poskytnout obdobné výsledky. Ve všech případech je nutný adekvátní software pro zpracování souboru naměřených dat a získání požadovaných výsledků. Výše uvedené postupy umožňují vyhodnotit volumetrickou chybu ve velké části pracovního prostoru, případně z měření získat i jednotlivé geometrické odchylky. Vždy záleží na konkrétní zvolené měřicí trajektorii, použitém výpočetním modelu, na způsobu měření a především na časové náročnosti a přesnosti dosažených výsledků. Jako velmi efektivní se jeví metody označované jako „chase the ball“ (R-Test, CapBall) a měření pomocí laser-trackerů. Jejich velkou výhodou je malá časová náročnost, široké spektrum využití a vysoká přesnost měření. Z hlediska komplexnosti měření ve smyslu obsáhnout co možná největší část pracovního prostoru s vysokou hustotou měřených bodů jasně vede laser-tracker. „Chase the ball“ v tomto ohledu nepatrně zaostává, protože během měření se mění pouze orientace obrobku vůči nástroji a vzdálenost je stejná. Pokud ovšem uvážíme možnost užití snímáčí hlavy i pro měření na prostorovém artefaktu (MT-Check, snímáčí hlava je stejná jako u R-Testu, výrobce IBS Precision Engineering [12]), možnosti měření se značně rozšiřují. BallBar je schopný provádět široké spektrum měření. Měřicí trajektorie je ovšem omezena konstantním poloměrem.

Testování přesnosti pomocí zkušebních obrobků je z hlediska ekonomičnosti a objemu získaných dat poněkud neefektivní. Získané údaje o přesnosti jsou omezeny pouze na část pracovního prostoru vyplněnou obrobkem. Jeho největší výhodou je přímá návaznost na práci stroje.

Problematika modelování geometrických chyb obráběcích strojů je úzce spjata s moderními měřicími zařízeními. Drtivá většina moderních elektronických měřících

zařízení obsahuje software, který pracuje s určitým typem kinematického modelu stroje. Výpočetní modely jsou z pravidla sestaveny pomocí kinematických řetězců a homogenních transformačních matic. Rozdílly jsou pouze ve složitosti jednotlivých modelů, respektive v počtu uvažovaných geometrických odchylek. Určitá část autorů preferuje uvažování klasických geometrických odchylek, tak jak jsou uvedeny v normách. Druhá část autorů jde cestou zjednodušení, to znamená snížením počtu uvažovaných parametrů na nutné minimum. Nutno podotknout, že oba přístupy jsou schopné podat shodné výsledky a záleží na konkrétním přístupu. V prostudované literatuře se ovšem jen zřídka objevuje přístup, kdy výpočetní model stroje uvažuje veškeré geometrické odchylky. To znamená šest chyb pohybu, dle šesti stupňů volnosti tělesa v prostoru pro každou strojní osu, chyby kolmosti mezi jednotlivými lineárními osami a čtyři chyby umístění pro každou rotační osu. Otázkou zůstává, jestli je uvažování všech těchto geometrických chyb nutné. Efektivní a více využívaný je přístup zjednodušení, či snížení počtu uvažovaných odchylek s ohledem na jejich významnost příspěvku na velikost výsledné volumetrické chyby.

Problematika softwarových kompenzací byla v této práci zmíněna jen okrajově. Závěrem této části proto může být jen strohé konstatování, že neúčinnější je metoda nepřetržité kompenzace interpolované dráhy, generované řídicím systémem. Ovšem nevýhodou je značná náročnost na výpočetní hardware. V rešerši je proto věnován prostor současným možnostem komunikace externích výpočetních zařízení s předními řídicími systémy OS.

Problematika teplotního chování obráběcích strojů je s jejich přesností úzce spjata. Vlivem teplotní roztažnosti materiálů dochází k nežádoucím deformacím nosné struktury, ale i dalších komponent stroje a tím k degradaci jeho přesnosti. Současné metody měření těchto jevů (např. dle ISO 230-3) celou problematiku výrazně zjednodušují. Z provedené rešerše vyplývá, že jev změny volumetrické přesnosti při teplotně neustáleném stavu nebyl doposud v oblasti víceosých obráběcích strojů komplexně zkoumán.

3. Cíle disertační práce

Cíle disertační práce vyplývají ze závěrů provedené kritické rešerše. Jak bylo již zmíněno, vyšší nároky na tvarovou složitost produkovaných dílců upevňují potřebu nasazení víceosých obráběcích strojů. S tímto faktem úzce souvisí i potřeba po lepší a efektivnější kontrole přesnosti jejich práce. Prostudované prameny literatury uvádějí, že výsledná přesnost práce stroje může být až z 70% ovlivněna jeho geometrickými odchylkami, přičemž významnou roli zde hraje i teplotní chování obráběcího stroje.

Kombinace lineárních a rotačních strojních os činí kinematickou strukturu stroje výrazně složitější v porovnání se stroji disponujícími pouze lineárními osami. Díky tomu, je složitější i řízení stroje, zejména v případě interpolovaných pohybů. Náročnější se rovněž stává i seřizování, či kalibrace stroje, s níž je zákonitě spojena i delší odstávka stroje z provozu. Z výše popsaného vyplývá potřeba po vývoji metod pro rychlé a komplexní testování stroje, umožňující provozní kalibraci v rámci pracovní směny. Možnost značných časových úspor rovněž nabízí využití výpočetních a simulačních modelů pro predikci chování obráběcího stroje či zpracování dat získaných měřeními.

Z rešerše dále vyplývá, že současné standardy nevěnují problematice komplexního testování pětiosých frézovacích strojů dostatečnou pozornost a to jak v oblasti geometrické či prostorové přesnosti, tak v oblasti teplotního chování. Jako jedno z možných řešení dané problematiky se jeví metoda rychlé provozní kalibrace stroje během nasazení v provozu. Díky tomu bude možné v relativně krátkém čase proměřit aktuální stav volumetrické přesnosti a na základě těchto údajů vygenerovat korekční zásah pro řídicí systém formou aktualizace tabulek softwarových korekcí.

Na základě zmíněných poznatků a závěrů provedené kritické rešerše lze stanovit tři stěžejní body, týkající se přesnosti pětiosých frézovacích center, které poskytují prostor pro vědecko-výzkumnou činnost:

- Metodika testování teplotně-mechanického chování obráběcího stroje dle ISO 230-3 poskytuje značně zjednodušený pohled. Chyba posunutí a natočení nástroje vůči obrobku je uvažována v celém objemu pracovního prostoru stejná, protože je stanovena na základě měření pouze jednoho, respektive dvou bodů. Nelze však s jistotou určit, jak výrazně se liší tento zjednodušený popis teplotně mechanického chování stroje od skutečnosti.
- V současné době není dostupná metoda měření, která by umožňovala popsat chyby posunutí nástroje vůči obrobku v celém objemu pracovního prostoru pětiosých frézovacích strojů malé a střední velikosti, kterou by bylo možné aplikovat pro opakované měření degradace přesnosti stroje v celém objemu pracovního prostoru při teplotně neustáleném stavu.

- Neexistuje postup pro rychlé změření a vyhodnocení souboru základních geometrických odchylek pětiosého frézovacího stroje, který by umožnil rychlé proměření v jednom časovém bodě z hlediska teplotně-mechanických deformací strojů a vygeneroval kompenzační data, která lze přímo zavést do řídicího systému stroje.

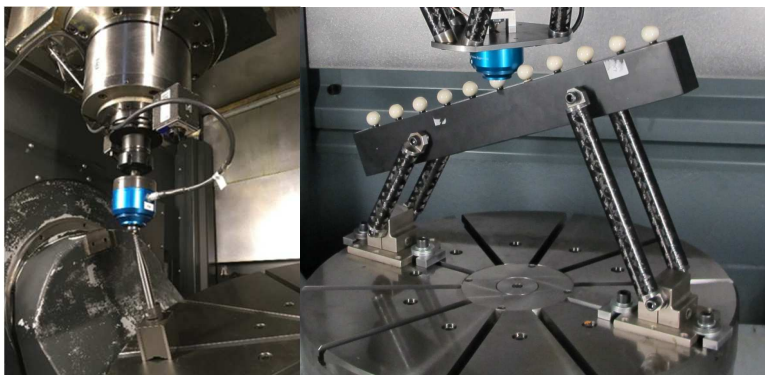
Výše uvedené body popisují nedostatky v oblasti přesnosti pětiosých frézovacích strojů a definují tak cíle předložené disertační práce. Předložené disertační práce předpokládá tyto cíle jejího řešení:

- Návrh vhodné metody pro rychlé a efektivní měření volumetrické přesnosti pracovního prostoru malých a středně velkých pětiosých frézovacích strojů. Metoda musí být navržena s ohledem na využitelnost měření při teplotně neustálených stavech. Navrženou metodu aplikovat na testování teplotně mechanického chování vybraného pětiosého frézovacího stroje. Na základě získaných výsledků z realizovaných měření identifikovat míru chyby výsledků měření dle standardu ISO 230-3.
- Návrh postupu pro rychlé proměření a vyhodnocení souboru základních geometrických odchylek pětiosých frézovacích strojů, který bude aplikovatelný na proměření v jednom časovém bodě z hlediska teplotně-mechanického chování strojů (přibližně do 5 minut). Navržený postup měření a vyhodnocení by měl být snadno aplikovatelný na široké spektrum pětiosých frézovacích center a přímo poskytnout kompenzační data, která bude možné zavést do řídicího systému testovaného stroje.
- Experimentální ověření navrženého postupu pro rychlé měření a vyhodnocení souboru geometrických odchylek na několika pětiosých strojích. Výsledky získané pomocí navrženého postupu porovnat s výsledky měření a vyhodnocení získanými na základě uplatnění konvenčních metod měření. Porovnání navrženého postupu měření a vyhodnocení s konvenčním přístupem poskytne zároveň i potřebnou verifikaci.

4. Vývoj metody pro testování volumetrické přesnosti pětiosých frézovacích center

Metoda je navržena s ohledem na využitelnost pro rychlé a efektivní testování aktuálního stavu volumetrické přesnosti pětiosého frézovacího centra. Předpoklady jsou aplikovatelnost na široké spektrum pětiosých strojů, využitelnost dat pro vyhodnocení důležitých parametrů geometrické přesnosti stroje a zároveň možnost provedení testu v rámci konkrétního teplotního stavu stroje.

Aparatura MT-Check [12] je zařízení, schopné určit polohy středu přesné měřicí koule v prostoru. Základ zařízení tvoří tři vysoce přesné kapacitní snímače lineárního přestavení, prostorově orientované po 120° . Ty snímají polohu středu měřicí koule. Zařízení lze použít v kombinaci s jednou koulí pro měření interpolovaných trajektorií, či v kombinaci s měřícím artefaktem, obsahujícím větší počet snímaných koulí (Obr. 1).



Obr. 1: Aparatura MT-Check.

4.1. Upevnění aparatury na stroj pomocí termostabilních přípravků

Pro upevnění měřicí aparatury na stroj byly navrženy speciální přípravky. Při konstrukci přípravků bylo dbáno především na tyto požadavky:

- upevnění samocentrovatelné hlavy (aparatury MT-Check) do osy vřetena;
- možnost volné rotace vřetena přičemž MT-Check se neotáčí;
- minimální teplotní deformace celé konstrukce přípravků;
- dostatečná statická a dynamická tuhost;
- možnost využití na více typech strojů (svislá i vodorovná osa vřetena);
- upevnění artefaktu s referenčními koulemi nebo upevnění referenčních koulí samostatně;
- možnost měření posunutí rotoru vřetene vůči statoru vřetene ve směru osy;

4.2. Vřetenový přípravek

Vřetenový přípravek slouží k upevnění samocentrovatelné hlavy na vřeteno. Návrh přípravku a jeho využití při testování teplotních deformací obráběcího stroje je uveden v autorově publikaci [13]. Základ konstrukce tvoří dvě ocelové desky spojené šesti kompozitovými trubkami. Mezi horní desku a vřeteno se umístí ocelové podložky ($\text{Ø}20,5/10,5\text{-}2$ mm), které zajistí stejný přenos tepla v případě použití na odlišných strojích. Na spodní desku je přišroubovaná samocentrovatelná hlava přibližně v ose vřetena. Na spodní desce je zároveň umístěna bezdotyková sonda na principu vířivých proudů (angl. eddy current), která snímá změnu polohy měřicího trnu ve vřetení. Díky tomu lze měřit změnu polohy rotoru vřetene vůči statoru vřetene v axiálním směru (osa Z). Návin uhlíkových vláken v kompozitových trubkách byl volen především s ohledem na minimální teplotní roztažnost.



Obr. 2: Vřetenový přípravek.

Teplotního chování přípravku bylo experimentálně ověřeno. Ohřev přípravku od vřetena stroje byl simulován pomocí topné fólie, která ohřívala základní desku. Celá sestava byla osazena odporovými teplotními čidly Pt100 a indukčními dotykovými snímači lineárního přestavení. Z výsledků měření vyplývá, že při ohřevu základní desky o 20 °C došlo k deformaci vřetenového přípravku ve svislém směru o $2\pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$.

4.3. Artefakt

Artefaktem se rozumí nosník vyrobený z uhlíkových vláken, na kterém je upevněno několik referenčních koulí. V tomto případě byl použit artefakt UMTK-1620 od firmy Unimetrik (Obr. 1). Na artefaktu je nalepeno 11 přesných keramických koulí $\text{Ø}22$ mm, které jsou od sebe vzdáleny 50 mm. Celková délka artefaktu je tedy 500 mm. Vzájemná poloha jednotlivých koulí je známá z kalibračního měření na souřadnicovém měřicím stroji. Zároveň je možné použít artefakt UMTK-1612, na kterém je nalepeno rovněž 11 koulí, ovšem s roztečí 100 mm. Celková délka

artefaktu je tedy 1000 mm. Artefakt je ke stolu testovaného stroje připevněn opět pomocí kompozitových trubek s vlepenými ocelovými koncovkami. Kompozitové trubky mají stejnou skladbu uhlíkových vláken jako trubky použité na vřetenovém přípravku. Výrobce artefaktů, firma Unimetrik, udává velmi malou teplotní roztažnost artefaktů. Ta je dosažena speciální skladbou uhlíkových vláken, z kterých je nosník artefaktu vyroben. Konkrétní hodnotu koeficientu tepelné roztažnosti však výrobce neuvádí. Výše popsaný postup měření využívá autor na pětiosém frézovacím stroji a představuje v publikaci [13].

4.4. Termostabilní modulární rám

Termostabilní modulární rám slouží k upevnění samostatných, referenčních koulí do pracovního prostoru stroje, představuje autor podrobněji v publikaci [14]. Rám se skládá z kompozitových trubek $\text{Ø}46/40$, které mají stejnou skladbu uhlíkových vláken, jako trubky použité na konstrukci vřetenového přípravku. Trubky lze volně spojovat k sobě pomocí vlepených ocelových koncovek se závitem. Rám lze využít pro měření na stroji se svislou i vodorovnou osou vřetená. Na rám se umísťují referenční ocelové koule $\text{Ø}22$. Termostabilní modulární rám je vhodné použít především na větší obráběcí stroje, kde nelze díky limitujícím rozměrům použít artefakt. Teplotní roztažnost použitých kompozitových trubek byla stejně jako v případě vřetenového přípravku experimentálně zjištěna. Kompozitová trubka byla umístěna do izolované nádoby s ohřívanou vodní lázní. Během experiment byla zaznamenávána deformace kompozitové trubky v axiálním směru v závislosti na změně teploty vodní lázně. Stanovený koeficient teplotní délkové roztažnosti kompozitivé trubky je roven $\alpha = 2 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$.

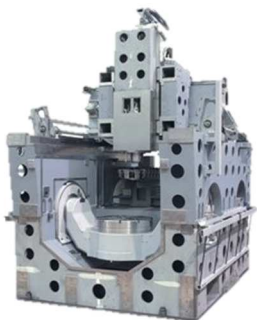


Obr. 3: Termostabilní modulární rám.

5. Aplikace navržené metody na měření změny volumetrické přesnosti při teplotně neustáleném stavu obráběcího stroje

Aplikace vyvinuté metody včetně získaných uvedených výsledků vychází z autorových publikací [13] a [14]. Praktické využití vyvinuté metody je prezentováno v autorově publikaci [15]. Bylo realizováno testování tepelných vlivů na změnu volumetrické přesnosti obráběcího stroje včetně vyhodnocení výsledků ve vyvinutém softwarovém prostředí. Metoda je aplikovatelná na široké spektrum obráběcích strojů frézovacího typu. Princip metody spočívá v měření polohy středu referenčních koulí pomocí zařízení MT-Check, neboli samocentrovatelné hlavy. Poloha středu referenčních koulí je během testu průběžně zaznamenávána v určitých intervalech. Rovněž je během testu snímána teplota okolí, teplota střežných komponent a vybraných pozic nosné konstrukce stroje a dále jsou vyčítány důležité parametry z řídicího systému stroje.

Vyvinutá metoda byla úspěšně otestována na pětiosém frézovacím centru MCU 630. V rámci provedených testů byl zkoumán vliv jednotlivých vnitřních zdrojů tepla na změnu volumetrické chyby testovaného stroje. Zkoumán byl vliv rotace vřetene při nízkých a vysokých otáčkách, pojezd jednotlivými strojními osami a interpolační pohyby strojních os spolu s rotací vřetene. Rovněž byla provedena volumetrická obdoba zkoušky ETVE.

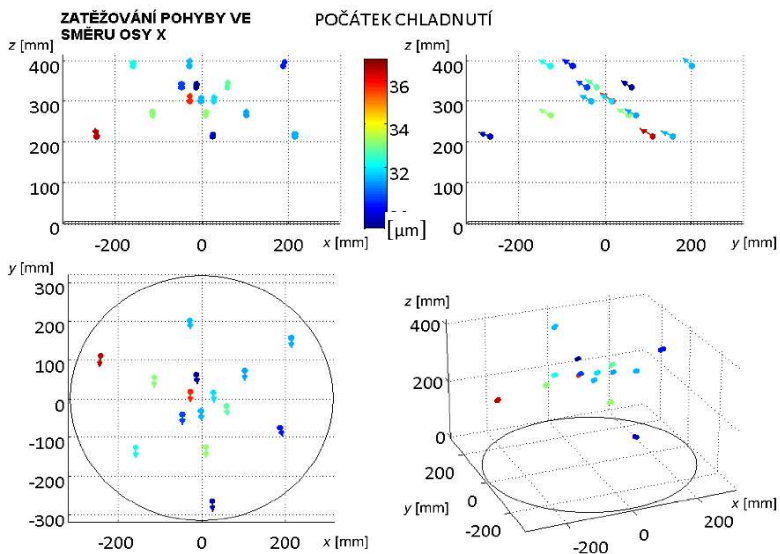


Řídicí systém		iTNC 530
Upínací kužel		ISO 50
Ot. vřetena	[min-1]	20 ~ 10 000
Výkon vřetena	[kW]	20/26
Zdvih v ose X	[mm]	700
Zdvih v ose Y	[mm]	820
Zdvih v ose Z	[mm]	550
Zdvih v ose A	[°]	-30 ~ 120
Zdvih v ose C	[°]	neomezeně

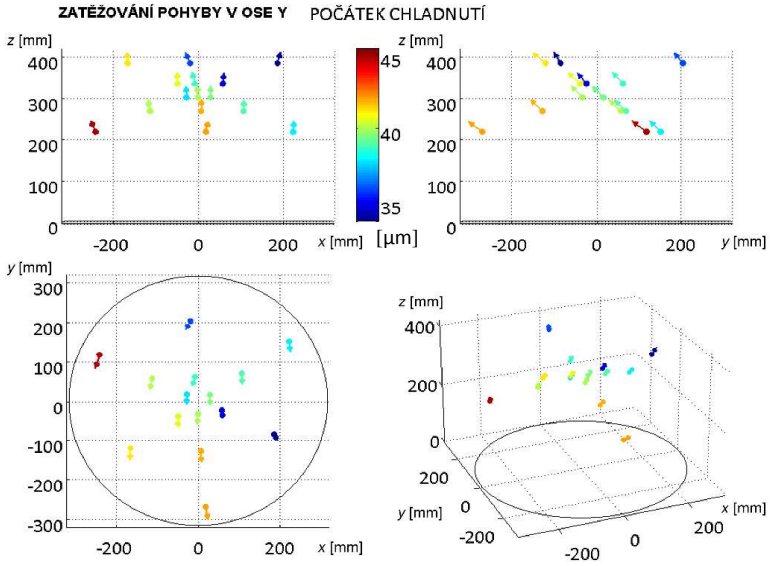
Obr. 4: Testovaný stroj MCU 630 a jeho parametry.

Na základě výsledků měření lze konstatovat, že v určitých případech dochází vlivem změny teploty nosné struktury stroje k nesymetrickým deformacím, které způsobí nerovnoměrnou změnu volumetrické chyby v rámci celého pracovního prostoru stroje. V určitých případech dochází nejen k rozdílu ve velikosti, ale i ve směru zjištěných deformací v jednotlivých měřených bodech.

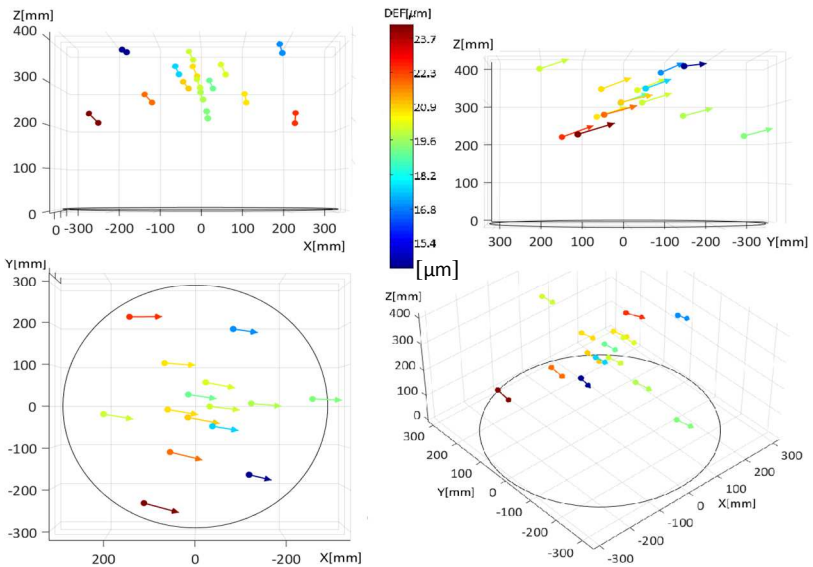
V případě tepelného zatěžování stroje rotací vřetene jsou změny téměř stejné v celém objemu pracovního prostoru. Tento fakt je způsoben především omezenou distribucí tepla od rotujícího vřetena do konstrukce stroje a jeho okolí. Teplu od pohonu elektro-vřetena postupuje do vřeteníku a dále do konstrukce stroje. Projeví se na teplotním čidle, umístěném na matici osy Z, ovšem teplota příčnicku (TPRICNIK) se již téměř nemění. Lze tedy konstatovat, že vlivem teplotního zatěžování způsobeného rotací vřetena dochází především ke změně proporci samotného vřetena a vřeteníku. Vřeteník se po příčnicku pohybuje jako celek a díky tomu je i deformace víceméně stejná v celém pracovním prostoru. Maximální deformace způsobené vlivem rotace vřetene dosáhly místy hodnoty přesahující $100\ \mu\text{m}$ a to téměř výhradně ve směru osy Z. Odlišnost ve velikosti zjištěných deformací v jednotlivých měřených bodech dosahuje zhruba 10%, přičemž směr posunutí je v zásadě stejný pro všechny měřené body. Průběh ve velikosti rozdílů teplotních deformací v jednotlivých měřených bodech je ale značně nahodilý a nelze v něm pozorovat souvislost s rotací. Při porovnání obou testů vlivu tepelného zatěžování od rotace vřetena ($7500\ \text{ot/min}$ a $500\ \text{ot/min}$) je patrné, že měřené teploty se příliš nemění a nárůst deformací při nižších otáčkách je výrazně nižší. Vzájemný posun statoru vůči rotoru v ose Z je v případě nízkých otáček zhruba poloviční vůči posunu při vysokých otáčkách.



Obr. 5: Vektory deformací po 10 hodinách zatěžování pohybem osy X.



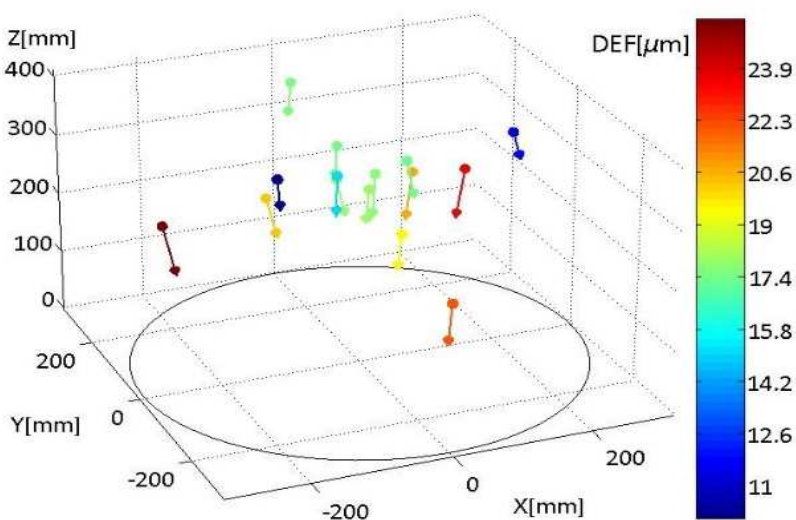
Obr. 6: Vektory deformací po 10 hodinách zatěžování pohybem osy Y.



Obr. 7: Vektory deformací po 10 hodinách zatěžování pohybem osy Z.

Oproti tomu, při zatěžování pojazdem strojními osami jsou patrné rozdíly ve velikosti a směru vektoru volumetrické chyby v jednotlivých měřených bodech. Ve všech případech teplotního zatěžování pohybem lineárních strojních os je patrná dominantní deformace v rovině YZ. Velikost deformace ve směru Y a Z dosáhly v některých bodech hodnoty až $25\ \mu\text{m}$. Deformace ve směru osy X nebyly tak výrazné, jejich rozdílné hodnoty však ve výsledku způsobují rozdílný směr vektoru deformace v jednotlivých bodech měření, viz prostorové znázornění na Obr. 5, Obr. 6 a Obr. 7. Velikost vektorů deformace v jednotlivých měřených bodech dosahovala až $35\ \mu\text{m}$, přičemž rozdílný byl i směr vektorů.

Teplotní zatěžování pohybem rotačních strojních os A a C má v zásadě menší vliv než v případě os lineárních. Z výsledků je patrné že, teplotní zatěžování pohybem osy A způsobuje jen velmi malé deformace. Kolébka je uložena v masivních bočnicích portálu, které se prohřívají velmi pozvolna. Díky symetrické konstrukci stroje se navíc deformace zjištěné v jednotlivých bodech příliš neliší velikostí ani směrem. Teplotní zatěžování rotací osy C vyvolalo deformace především ve směru osy Z, deformace ve směru X a Y lze v tomto případě považovat za zanedbatelné. Velikost a směr deformací se v jednotlivých měřených bodech příliš neliší. Osa C se tedy chová obdobně jako vřeteno s tím rozdílem, že vyvolané deformace jsou výrazně menší.



Obr. 8: Vektory deformací po 15 hodinách zatěžování pohybem osy C.

Komplexnější teplotní zatěžování v podobě kruhové interpolace os X a Y a následné roztočení vřetena ukázalo, že dominantní vliv na změnu přesnosti stroje v průběhu testu má teplotní zátěž od rotace vřetena. Po 15 hodinách kruhové interpolace os

X a Y, v okamžiku před roztočením vřetene byla velikost deformací okolo $20 \mu\text{m}$ ve směru Y a Z. Deformace ve směru osy X byly opět výrazně menší. Rozdíl mezi maximální a minimální deformací v jednotlivých bodech měření činil v tomto okamžiku přibližně $10 \mu\text{m}$ ve všech směrech souřadného systému stroje. Roztočením vřetena došlo k výrazným změnám v průběhu deformací ve všech směrech. Přibližně po 3 hodinách rotace došlo k nárůstu deformace ve směru osy Z. Nárůst byl stejný ve všech měřených bodech, což odpovídá i testu, kdy byl zkoumán vliv zatěžování pouze rotací vřetena. Nárůst deformací je patrný rovněž ve směru X a Y. Rozdíl ve velikosti deformace v jednotlivých měřených bodech činil po 30 hodinách testu přibližně $15 \mu\text{m}$.

Na základě těchto poznatků lze konstatovat, že rotace vřetene má dominantní vliv na změnu přesnosti stroje. Deformace vyvolané teplotním zatěžováním od rotace vřetene jsou několikanásobně větší než v případě teplotního zatěžování pohybem strojními osami. Tyto deformace jsou však v zásadě stejné v celém objemu pracovního prostoru. Teplotní zátěž od pohonu lineárních a rotačních os vyvolává výrazně menší změnu přesnosti. Důležité ovšem je, že deformace vyvolané teplotním zatěžováním pohybem strojních os nejsou konstantní v celém objemu pracovního prostoru. Rozdíl je patrný, jak ve velikosti, tak ve směru deformací.

Výše uvedené poznatky jasně naznačují, že metodika testování teplotně-mechanického chování obráběcího stroje dle ISO 230-3 [16] poskytuje značně zjednodušený pohled. Chyba posunutí a natočení nástroje vůči obrobku je dle uvedené normy uvažována v celém objemu pracovního prostoru stejná, protože je stanovena na základě měření pouze jednoho, respektive dvou bodů. Takové zjednodušení je platné pouze v případě testování vlivu teplotní zátěže od rotace vřetena. V případě teplotního zatěžování pohybem strojních os a to především těch lineárních, jsou způsobené odchylky v rámci celého objemu pracovního prostoru nesymetrické. Liší se jak velikostí, tak směrem.

Navržená metoda umožňuje rychlé a efektivní měření volumetrické přesnosti pracovního prostoru malých a středně velkých pětiosých frézovacích strojů. Metoda je vhodná pro měření při teplotně neustálených stavech. Malým nedostatkem je pouze větší časová náročnost (stroj chladne) v porovnání s konvenčním měřením dle ISO 230-3 [16]. Časovou náročnost měřicího cyklu je možné ovlivnit počtem měřených bodů.

6. Postup pro měření a vyhodnocení souboru geometrických odchylek

Postup je navržen s ohledem na využití pro rychlé proměření a následné vyhodnocení souboru základních geometrických odchylek pětiosých frézovacích strojů a to v jednom časovém bodě z hlediska teplotně-mechanického chování strojů (přibližně do 5 minut). Navržený postup měření a vyhodnocení by měl být snadno aplikovatelný na široké spektrum pětiosých frézovacích center a přímo poskytnout kompenzační data, která bude možné zavést do řídicího systému testovaného stroje. Odvození dále popsaného postupu autor prezentuje v publikaci [17].

Před samotným návrhem postupu pro měření a vyhodnocení souboru geometrických odchylek je třeba stanovit, které geometrické odchylky budou vyhodnocovány, případně které lze z hlediska jejich významnosti příspěvku na výslednou přesnost nastavení pozice a orientace nástroje vůči obrobku zanedbat.

Vliv jednotlivých geometrických odchylek u konkrétních kinematických konfigurací tříosých a pětiosých frézovacích strojů je podrobně studován v autorových publikacích [18] a [19]. Výsledky zde provedených citlivostních analýz ukazují, že různé kinematické konfigurace obráběcích strojů jsou jinak citlivé na konkrétní geometrické odchylky. Některé geometrické odchylky lze zanedbat, jiné pak mají stěžejní vliv na výslednou volumetrickou přesnost stroje. Obecně však ze simulací a citlivostních analýz uvedených v autorových publikacích [18] a [19] vyplývá, že geometrické odchylky vzájemné polohy jednotlivých strojních os mají zásadní vliv na výslednou volumetrickou přesnost a to nehlédě na kinematickou konfiguraci konkrétního stroje. Obdobné závěry lze nalézt i v disertační práci Svobody [20], zabývající se problematikou prostorové přesnosti tříosých frézovacích strojů při teplotně neustálených stavech. Jedním z dílčích praktických výstupů práce je konstatování, že odchylky kolmosti ve všech souřadných rovinách mají dominantní vliv na degradaci prostorové přesnosti stroje při teplotně neustáleném stavu. Tyto změny prokazatelně souvisí s nerovnoměrným prohříváním nosné struktury stroje během tepelného zatěžování testovaného stroje od vnitřních i vnějších zdrojů tepla. Svoboda [20] dále konstatuje, že k relativně velmi malým změnám došlo u odchylek polohování ve všech osách, což zpochybňuje zažitý předpoklad, že při tepelném zatěžování obráběcího stroje dochází k výrazné degradaci přesnosti polohování. Na základě těchto poznatků lze tedy určit soubor geometrických odchylek, majících stěžejní vliv na výslednou volumetrickou přesnost obráběcího stroje. Obecně se jedná o odchylky vzájemné pozice a orientace strojních os, jmenovitě tedy o odchylky kolmosti mezi lineárními osami a odchylky pozice a orientace středů otáčení rotačních os. Odchylky pozice a orientace středů otáčení rotačních os plní zcela zásadní roli v případě, že stroj obrábí po trajektorii vzniklé interpolací lineárních a rotačních os.

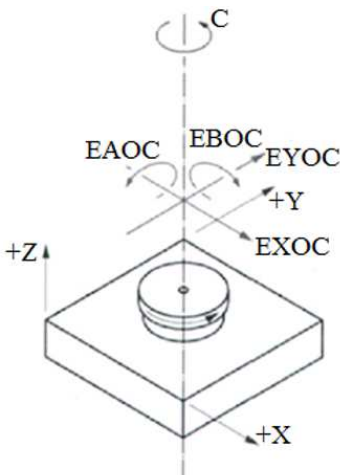
Pro samotné měření v rámci navrženého postupu bude vhodné využít opět měřicí aparaturu MT-Check. Z odchylek zjištěných podél trajektorie (kružnice, nebo její

část) při interpolaci rotačních a lineárních os lze vyhodnotit celou řadu parametrů geometrické přesnosti mající stěžejní vliv na prostorovou přesnost stroje. Na základě poznatků uvedených v tomto odstavci lze tvrdit, že odchylky vzájemné kolmosti mezi lineárními strojními osami a odchylky pozice a orientace středů otáčení rotačních strojních os mají na výslednou přesnost víceosých interpolačních pohybů stroje stěžejní vliv. Proto jim bude věnována patřičná pozornost.

Vyhodnocení odchylek pozice a orientace středů otáčení a odchylek kolmosti mezi lineárními osami bylo realizováno ve výpočetním softwaru MATLAB. Odchylky naměřené sondou MT-Check byly přičteny k souřadnicím ideální trajektorie generované kinematickým modelem stroje. Tak je získána skutečná trajektorie, ze které lze následně vyhodnocovat vybrané parametry geometrické přesnosti stroje.

6.1. Odchylky pozice a orientace středů otáčení rotačních os

Odchylky pozice a orientace středů otáčení lze velmi efektivně vyhodnotit z trajektorie ve tvaru kružnice, respektive její části, získané interpolací jedné rotační a dvou lineárních os. Taková trajektorie v ideálním případě leží v jedné z rovin souřadného systému stroje. Střed trajektorie je pak v ose otáčení rotační osy. Vlivem zmíněných odchylek pozice a orientace osy otáčení je skutečný střed trajektorie odlišný. Tyto odchylky získáme proložení skutečné trajektorie kružnicí (v rovině interpolace), respektive přímkou (ve dvou rovinách kolmých na rovinu interpolace). Rozdíl polohy středu proložené kružnice od středu ideální kruhové trajektorie představuje odchylky pozice středu otáčení v rovině interpolace (EYOA a EZOA pro osu A, resp. EXOC a EYOC pro osu C, viz Obr. 9). Směrnice proložené přímkou vůči souřadnému systému představuje odchylku orientace osy otáčení (EBOA a ECOA pro osu A, resp. EAOC a EBOC pro osu C, viz Obr. 9).



Obr. 9: Odchylky pozice a orientace rotační osy C.

Proložení trajektorie kružnicí a přímkou je realizováno metodou nejmenších čtverců. Popis aplikace potřebného matematického aparátu uvádí pramen [21].

6.2. Odchylky vzájemné kolmosti lineárních os

Postup vyhodnocení odchylek kolmosti z kruhové trajektorie, konané při současném pohybu dvou lineárních a jedné rotační osy. Odchylka kolmosti mezi interpolujícími lineárními osami se na výsledné kruhové trajektorii projeví eliptickým tvarem s hlavní osou ležící na diagonále natočené o 45° či 135° vůči souřadnému systému [22], [11]. Orientace hlavní osy eliptické trajektorie závisí na znaménku odchylky kolmosti. V případě, že je odchylka záporná, je úhel 45° , pokud odchylka nabývá kladné hodnoty je úhel 135° . V praxi je tvar výsledné trajektorie ovlivněn celou řadou faktorů (geometrické chyby, chyby v regulaci servopohonů, chyby transformace souřadnic v ŘS stroje a další). Superpozicí těchto faktorů dochází ke značné deformaci výsledné trajektorie. Pro potřeby vyhodnocení odchylky kolmosti je tedy vhodné získanou trajektorii, respektive naměřenou množinu bodů proložit elipsou. Metoda proložení množiny naměřených bodů elipsou je převzata z [21]. Použita je Gauss-Newtonova nelineární metoda řešení minima součtu čtverců.

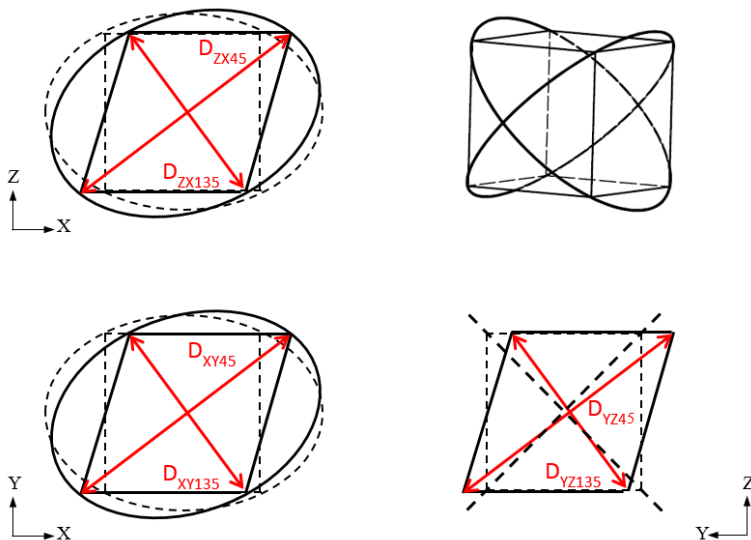
Odchylka kolmosti se z výsledné trajektorie (interpolované jednou rotační a dvěma lineárními osami) vyhodnotí stejným způsobem jako při testu diagonálního přestavení [11] [23]. Odchylka kolmosti C se vypočte dle vztahu (1). Kde ΔD je rozdíl průměru kruhové trajektorie v $\pm 45^\circ$ a D_0 je jmenovitý průměr interpolované kruhové trajektorie [11].

$$C = \frac{\Delta D}{D_0} \quad (1)$$

Vztah pro výpočet odchylky kolmosti C pak bude ve tvaru (2). Kde D_{45} je průměr proložené elipsy v úhlu 45° a D_{135} je průměr v úhlu 135° . D_0 je jmenovitý průměr interpolované kruhové trajektorie.

$$C = \frac{(D_{45} - D_{135})}{D_0} \quad (2)$$

Vzorec (2) lze aplikovat na testy interpolace jedné rotační a dvou lineárních os, kdy trajektorie leží v jedné z rovin souřadného systému stroje. V případě pětiosého frézovacího stroje klasické koncepce (tři lineární a dvě rotační osy) lze tímto způsobem získat maximálně dvě ze tří odchylek kolmosti mezi lineárními osami. Vyhodnocení všech třech odchylek kolmosti vyžaduje změření dvou symetrických trajektorií. V průmětech do jednotlivých rovin souřadného systému stroje nalezneme vzájemně kolmé průměry D_{45} a D_{135} potřebné pro výpočet jednotlivých odchylek.



Obr. 10: Výpočet odchylek kolmosti mezi lineárními osami ze dvou symetrických trajektorií, ležících mimo roviny souřadného systému stroje. Interpolace os X, Y, Z a C, při vyklopení osy A o $\pm 45^\circ$.

7. Ověření navrženého postupu měření a vyhodnocení souboru geometrických odchylek

Byla provedena série testů volumetrické přesnosti podél interpolované trajektorie, potřebná pro vyhodnocení vybraného souboru geometrických odchylek. Jednalo se o pohyby podél trajektorií tvořených interpolací os XYC, YZA a XYZAC. V prvních dvou případech byla měření realizována za účelem zjištění odchylek pozice a orientace středů otáčení rotačních os A a C. Pro vyhodnocení odchylek vzájemné kolmosti mezi lineárními osami byly realizovány testy při součinnosti os XYC, přičemž osa A byla vyklopena o konstantní úhel $\pm\varphi_A$. Z dat získaných měřením byl následně pomocí navrženého postupu (viz. Kapitola 6) vyhodnocen soubor vybraných geometrických odchylek.

7.1. Vyhodnocení vybraných geometrických odchylek

Pomocí postupu byl z naměřených dat vyhodnocen soubor základních geometrických odchylek. Navržený postup byl aplikován na dva zástupce pětiosých frézovacích strojů. Vyhodnocené odchylky jsou uvedeny v Tab. 1 až Tab 4.

Tab. 1: Hodnoty odchylek vzájemné kolmosti lineárních os, stroj MCU 700.

EXOY [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	EZOX [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	EYOZ [$\mu\text{m}/\text{mm}$]
-2	12	35

Tab. 2: Hodnoty odchylek pozice a orientace středů otáčení rotačních os A a C, stroj MCU 700.

EYOA [μm]	EZOA [μm]	EBOA [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	EOCA [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	EXOC [μm]	EYOC [μm]	EAOB [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	EBOC [$\mu\text{m}/\text{mm}$]
-5	-68	-167	147	-5	-2	-14	-88

Tab. 3: Hodnoty odchylek vzájemné kolmosti lineárních os, stroj MU 6300.

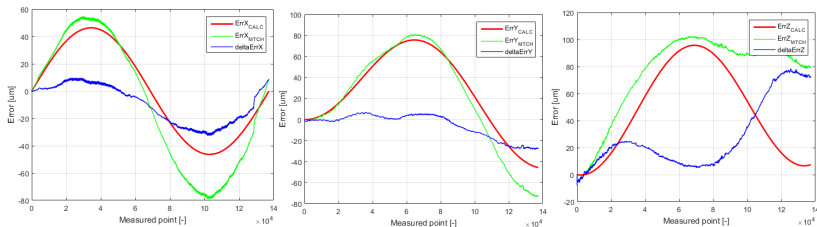
EXOY [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	EZOX [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	EYOZ [$\mu\text{m}/\text{mm}$]
13	34	11

Tab. 4: Hodnoty odchylek pozice a orientace středů otáčení rotačních os A a C, stroj MU 6300.

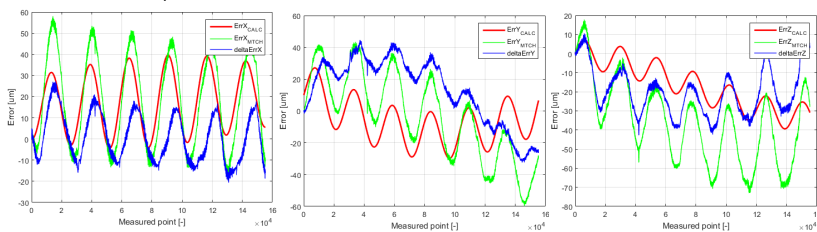
EYOA [μm]	EZOA [μm]	EBOA [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	EOCA [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	EXOC [μm]	EYOC [μm]	EAOA [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	EBOC [$\mu\text{m}/\text{mm}$]
-3	-63	28	27	-18	-13	71	6

7.2. Vliv vyhodnocených geometrických odchylek na volumetrickou přesnost obráběcího stroje

Soubor vybraných geometrických odchylek, vyhodnocených pomocí navrženého postupu, následně posloužil jako vstupní data pro kinematické modely testovaných obráběcích strojů. Postup sestavení takového kinematického modelu uvádí autor ve svých publikacích [18], [19] a [24]. Kinematickým modelem byla vypočtena odchylka podél měřených pětiosých trajektorií tvořená superpozicí uvažovaných geometrických odchylek. Výsledky porovnání měřených a vypočtených odchylek podél interpolovaných trajektorií ukazují, že odchylky kolmosti mezi lineárními osami a odchylky pozice a orientace středů otáčení rotačních os tvoří více jak polovinu výsledné volumetrické odchylky podél měřené trajektorie tvořené interpolací os XYZAC. Výsledky pro oba testované stroje jsou znázorněny na Obr. 11 a Obr. 12. Zbytková volumetrická odchylka je tvořena dalšími 30 geometrickými odchylkami. Celkový počet činí v případě pětiosého frézovacího stroje 41 geometrických odchylek, viz [25].



Obr. 11: MCU 700 - porovnání výsledků měření a simulace volumetrické odchylky podél trajektorie interpolované osami XYZAC – odchylky ve směru osy X, Y a Z.



Obr. 12: MU 6300 - porovnání výsledků měření a simulace volumetrické odchylky podél trajektorie interpolované osami XYZAC – odchylky ve směru osy X, Y a Z.

7.3. Porovnání vyhodnocených geometrických odchylek s konvenčním měřením

Hodnoty geometrických odchylek získaných pomocí navrženého postupu byly porovnány s výsledky měření získanými na základě uplatnění konvenčních metod měření. Čímž byl celý navržený postup vyhodnocení souboru vybraných geometrických odchylek verifikován. Výsledky porovnání jsou uvedeny v Tab. 5 až Tab. 10.

Tab. 5: Porovnání vyhodnocených a konvenčně měřených odchylek – odchylky kolmosti, stroj MCU 700.

	EXOY [$\mu\text{m}/\text{m}$]	EZOX [$\mu\text{m}/\text{m}$]	EYOZ [$\mu\text{m}/\text{m}$]
Výpočet	-2	12	35
Konvenční měření	4	15	39

Tab. 6: Porovnání vyhodnocených a konvenčně měřených odchylek – odchylky pozice a orientace středu otáčení osy C, stroj MCU 700.

	EXOC [μm]	EYOC [μm]	EAOE [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ABOC [$\mu\text{m}/\text{m}$]
Výpočet	-5	2	-14	-88
Konvenční měření	-	-	-15	-84
SW IBS	-6	4	-	-

Tab. 7: Porovnání vyhodnocených a konvenčně měřených odchylek – odchylky pozice a orientace středu otáčení osy A, stroj MCU 700.

	EYOA	EZOA	EBOA	ACOA
	[μm]	[μm]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]
Výpočet	-5	68	-145	-168
Konvenční měření	-	-	-	-
SW IBS	-9	70	-	-

Tab. 8: Porovnání vyhodnocených a konvenčně měřených odchylek – odchylky kolmosti, stroj MU6300.

	EXOY	EZOX	EYOZ
	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]
Výpočet	12	34	10
Konvenční měření	12	32	12

Tab. 9: Porovnání vyhodnocených a konvenčně měřených odchylek – odchylky pozice a orientace středu otáčení osy C, stroj MU 6300.

	EXOC	EYOC	EAOB	ABOC
	[μm]	[μm]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]
Výpočet	-18	-13	71	6
Konvenční měření	-	-	-	-
SW IBS	-19	-14	-	-

Tab. 10: Porovnání vyhodnocených a konvenčně měřených odchylek – odchylky pozice a orientace středu otáčení osy A, stroj MU 6300.

	EYOA	EZOA	EBOA	ACOA
	[μm]	[μm]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]
Výpočet	-3	-63	28	27
Konvenční měření	-	-	24	35
SW IBS	-2	-61	-	-

8. Závěr

Cíle předložené disertační práce, stanovené na základě poznatků souhrnné kritické rešerše, popisují zjištěné nedostatky v oblasti přesnosti pětiosých frézovacích strojů. Závěrečná kapitola uvádí praktický přínos výsledků předložené disertační práce, hodnotí dosažení vytyčených cílů a diskutuje možnosti dalšího vývoje řešené problematiky.

8.1. Přínos disertační práce

Hlavními přínosy předložené disertační práce je zlepšení metodiky testování teplotně-mechanického chování pětiosých frézovacích center. Díky navržené a aplikované metodě lze důkladně testovat chování stroje při teplotně neustáleném stavu, přičemž změna přesnosti vyvolaná teplotně-mechanickým chováním stroje může být měřena v celém objemu pracovního prostoru.

Navržená metoda je dobře aplikovatelná na testy teplotně mechanického chování malých a středně velkých obráběcích strojů. Výsledky testů na konkrétním stroji potvrzují předpoklad nehomogenity rozložení odchylek relativního polohování nástroje vůči obrobku, způsobený teplotně mechanickým chováním stroje [13], [14]. Lze tedy konstatovat, že standardní přístup testování tepelných vlivů na změnu přesnosti stroje, definovaný normou ISO 230-3 [16] celou problematiku značně zjednodušuje. Prostorové vnímání přesnosti stroje vyžaduje měření odchylky ve více než jednom, resp. dvou bodech pracovního prostoru stroje (viz postup dle ISO 230-3 [16]). Metoda navržená v předložené disertační práci je pro tento přístup vhodná.

Praktickým přínosem předložené disertační práce je rovněž navržený postup pro rychlé proměření a následné vyhodnocení souboru základních geometrických odchylek pětiosých frézovacích strojů. Navržený postup měření a vyhodnocení je snadno aplikovatelný na široké spektrum pětiosých frézovacích center a přímo poskytuje data pro SW kompenzace konkrétních geometrických odchylek v ŘS stroje.

Nasazení navrženého postupu pro měření a vyhodnocení souboru základních geometrických odchylek při testech na dvojici pětiosých frézovacích strojů ukázalo významnost podílu uvažovaných geometrických odchylek na výsledné prostorové odchylce nástroje vůči obrobku podél měřené trajektorie. Tyto závěry shrnuje rovněž autorova publikace [17].

Obecným přínosem předložené disertační práce je tedy zdokonalení metodiky testování přesnosti pětiosých frézovacích center a zároveň hlubší porozumění dané problematice na základě poznatků získaných při praktických testech.

8.2. Zhodnocení dosažení cílů disertační práce

Navržená metoda umožňuje rychlé a efektivní měření volumetrické přesnosti pracovního prostoru malých a středně velkých pětiosých frézovacích strojů.

Metoda je dobře aplikovatelná pro měření při teplotně neustálených stavech. Nabízí možnosti komplexního testování teplotních vlivů na změnu přesnosti pětiosých frézovacích strojů. V porovnání se standardním postupem dle normy ISO 230-3 [26] lze odchylky vyvolané teplotně mechanickým chováním stroje měřit v celém objemu jeho pracovního prostoru. Malým nedostatkem je pouze větší časová náročnost (stroj chladne) v porovnání s konvenčním měřením dle ISO 230-3 [16]. Časovou náročnost měřicího cyklu je možné ovlivnit počtem měřených bodů.

Předpoklad nehomogenity rozložení odchylek relativního polohování nástroje vůči obrobku, způsobený teplotně mechanickým chováním stroje, byl rovněž v předložené disertační práci experimentálně ověřen. Získané poznatky potvrzují, že standardní přístup testování tepelných vlivů na změnu přesnosti stroje, definovaný normou ISO 230-3 [16] celou problematiku poněkud zjednodušuje. Pokud má být přesnost stroje vnímána prostorově, je třeba měřit odchylky ve více než jednom, resp. dvou bodech pracovního prostoru stroje (viz postup dle ISO 230-3 [16]).

Výsledky testů teplotně mechanického chování konkrétního stroje při teplotním zatěžování jednotlivými vnitřními zdroji tepla. Na základě získaných poznatků lze konstatovat, že rotace vřetene má dominantní vliv na změnu přesnosti stroje. Deformace vyvolané teplotním zatěžováním od rotace vřetene jsou několikanásobně větší než v případě teplotního zatěžování pohybem strojními osami. Tyto deformace jsou však v zásadě stejné v celém objemu pracovního prostoru. Teplotní zátěž od pohonu lineárních a rotačních os vyvolává výrazně menší změnu přesnosti. Důležité ovšem je, že deformace vyvolané teplotním zatěžováním od pohybu strojních os nejsou konstantní v celém objemu pracovního prostoru. Rozdíl je patrný jak ve velikosti, tak ve směru vektoru deformací.

Výše uvedené poznatky jasně naznačují, že metodika testování teplotně-mechanického chování obráběcího stroje dle ISO 230-3 [16] poskytuje značně zjednodušený pohled. Chyba posunutí a natočení nástroje vůči obrobku je dle uvedené normy uvažována v celém objemu pracovního prostoru stejná, protože je stanovena na základě měření pouze jednoho, respektive dvou bodů. Takové zjednodušení je platné pouze v případě testování vlivu teplotní zátěže od rotace vřetene. V případě teplotního zatěžování pohybem strojních os a to především těch lineárních, jsou způsobené odchylky v rámci celého objemu pracovního prostoru nesymetrické. Liší se jak velikostí, tak směrem.

Byl navržen postup pro měření a vyhodnocení souboru geometrických odchylek pětiosého frézovacího stroje. Navržený postup umožňuje rychlé proměření a následné vyhodnocení souboru základních geometrických odchylek pětiosých frézovacích strojů a to v jednom časovém bodě z hlediska teplotně-mechanického chování strojů (přibližně do 5 minut). Postup měření a vyhodnocení je snadno aplikovatelný na široké spektrum pětiosých frézovacích center. Výsledky jsou přímo aplikovatelné do ŘS stroje v podobě SW kompenzací jednotlivých geometrických odchylek. V první řadě byl na základě prostudovaných publikací stanoven soubor,

vybraných geometrických odchylek, majících stěžejní vliv na přesnost relativního polohování nástroje vůči obrobku. Pro samotné měření v rámci navrženého postupu je využívána měřicí aparatura MT-Check.

Postupu pro rychlé proměření a následné vyhodnocení souboru základních geometrických odchylek pětiosých frézovacích strojů je rovněž experimentálně ověřen. Ověření je demonstrováno na dvojici pětiosých frézovacích strojů. Nejprve byla provedena série testů volumetrické přesnosti podél interpolované trajektorie, potřebná pro vyhodnocení vybraného souboru geometrických odchylek. Naměřená data byla následně zpracována, přičemž byl získán soubor vybraných geometrických odchylek. Hodnoty geometrických odchylek získaných pomocí navrženého postupu byly porovnány s výsledky měření a vyhodnocení získanými na základě uplatnění konvenčních metod měření, čímž byl celý navržený postup měření a vyhodnocení souboru vybraných geometrických odchylek verifikován.

Soubor vybraných geometrických odchylek vyhodnocených pomocí navrženého postupu následně posloužil jako vstupní data pro kinematické modely testovaných obráběcích strojů. Kinematickým modelem byla vypočtena odchylka podél měřených pětiosých trajektorií tvořená superpozicí uvažovaných geometrických odchylek. Výsledky porovnání měřených a vypočtených odchylek podél interpolovaných trajektorií ukazují, že odchylky kolmosti mezi lineárními osami a odchylky pozice a orientace středů otáčení rotačních os tvoří více jak polovinu výsledné volumetrické odchylky podél měřené trajektorie tvořené interpolací os XYZAC. Zbytková volumetrická odchylka je tvořena dalšími 30 geometrickými odchylkami. Celkový počet možných uvažovaných geometrických odchylek je v případě pětiosého frézovacího stroje 41, viz [25]. Uvedený postup měření volumetrické přesnosti pětiosého frézovacího stroje je efektivní především pro rychlou provozní kalibraci například během pracovní směny, kdy stroj pracuje při tepelně neustáleném stavu a jeho přesnost se v čase mění. Vyhodnocované parametry geometrické přesnosti mohou být zaneseny v podobě SW korekce do ŘS stroje.

8.3. Možnosti dalšího vývoje řešené problematiky

Vyvinutá metoda nabízí poměrně široké možnosti dalšího využití při testování teplotně mechanického chování pětiosých frézovacích strojů. V první řadě bude vhodné provést testy na širokém spektru malých a středně velkých pětiosých frézovacích strojů. Výsledky poslouží k lepšimu porozumění teplotně mechanického chování jednotlivých kinematických konfigurací testovaných strojů. Rovněž se nabízí adaptace metody pro testování dalších typů obráběcích strojů, soustruhy, soustružnická centra atd.

Vyvinutá metoda je rovněž využitelná jako nástroj pro kalibrační měření pro modely predikující teplotně mechanické chování obráběcích strojů. Zdárným příkladem praktického využití vyvinuté metody pro získání kalibračních dat je experiment na tříosém horizontálním frézovacím stroji prezentovaný v autorově publikaci [15].

Vyvinutý postup pro rychlé proměření a následné vyhodnocení souboru základních geometrických odchylek pětiosých frézovacích strojů bude vhodné upravit tak, aby byla možná jeho implementace do ŘS stroje. Díky tomu by mohl být celý proces kalibrace stroje značně automatizován a efektivně využíván pro procesní kalibraci stroje během jeho provozu.

Rovněž se nabízí možnosti rozšíření postupu o stanovení dalších geometrických odchylek. Díky tomu by bylo dosaženo lepšího zpřesnění testovaného stroje. Další možnosti pro zvýšení přesnosti stroje, respektive dosažení přesnější kompenzace by bylo vhodné zbytkovou volumetrickou odchylku (resp. její složky X, Y a Z v MCS) podél měřené trajektorie extrapolovat do celého pracovního prostoru stroje. Extrapolovaná odchylka pak může být využita jako vstupní data pro volumetrickou kompenzaci. Je však nutné nalezení vhodné metody extrapolace zjištěných odchylek do celého objemu pracovního prostoru stroje.

Použitá literatura

- [1] BOHEZ, E. L. J. Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis. In: *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002, č. 42., Elsevier Science Ltd., s. 505 - 520. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00134-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00134-1)
- [2] ABBASZADEH-MIR, Y. a kol. Theory and simulation for the identification of the link geometric errors for a five-axis machine tool using a telescoping magnetic ball-bar. In: *International Journal of Production Research*, 2002, č. 40, v. 18, Taylor & Francis Ltd., s. 4781-97. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00207540210164459>
- [3] ZARGARBASHI, S. H. H. a J. R. R. MAYER. Single setup estimation of a five-axis machine tool eight link errors by programmed end point constraint and on the fly measurement with Capball sensor. In: *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2009, č. 49, Elsevier Science Ltd., s. 759 - 766. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.05.001>
- [4] FLORUSSEN, G. H. J. a kol. Assessing geometrical errors of multi-axis machines by three-dimensional length measurements. In: *Measurement*, 2001, č. 30, Elsevier Science Ltd. s. 241-55. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0263-2241\(01\)00016-1](https://doi.org/10.1016/S0263-2241(01)00016-1)
- [5] ANDOLFATTO, L. S. LAVERNHE a J. R. R. MAYER. Evaluation of servo, geometric and dynamic error sources on five-axis high-speed machine tool. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, č. 51, Elsevier Science Ltd., s. 787 - 796. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.07.002>
- [6]
- [7] SCHWENKE, H. a kol. Geometric error measurement and compensation of machines – An update. In: *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, CIRP, 2008, č. 57, v. 2, CIRP, s. 660 - 675. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.008>
- [8] RAMU, P. a kol. Development of a parametric model and virtual machine to estimate task specific measurement uncertainty for a five-axis multi-sensor coordinate measuring machine. In: *Precision engineering*, 2011, č. 35, Elsevier Science Ltd., s. 431 - 439. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2011.01.003>
- [9] ISO 230-7: 2015, Test code for machine tools – Part 7: Geometric accuracy of axes of rotation. ICS 25.080.01. 2. vyd. Geneva: ISO, červen 2015.

- [10] ISO 10791-6: 2014, Test conditions for machining centres -- Part 6: Accuracy of speeds and interpolations, ICS 25.040.10. 2. vyd. Geneva: ISO, prosinec 2014.
- [11] NAS 979 UNIFORM CUTTING TESTS - NAS SERIES METAL CUTTING EQUIPMENT SPECIFICATIONS. Aerospace Industries Association of America Inc. Květen 2013.
- [12] ČSN ISO 230-1:2014, Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek, ICS 25.080.01. 1. vyd. Praha: ÚNMZ, leden 2014.
- [13] IBS Precision Engineering [online]. [cit. 2017-9-6]. Dostupné také z: <http://www.ibspe.com/>
- [14] MORÁVEK, M., BUREŠ, J., a HOREJŠ, O. Volumetric measurement of machine tool thermal deformation using an MT-Check probe. In: Laser Metrology and Machine Performance XI. 11th International Conference and Exhibition on Laser Metrology, Machine Tool, CMM & Robotic Performance. Huddersfield, 17.03.2015 - 18.03.2015. Cranfield, Bedfordshire: euspen. 2015, s. 305-313. ISBN 978-0-9566790-5-5. Dostupné z: <http://www.euspen.eu/OurEvents/LAMDAMAP2015.aspx>
- [15] MORÁVEK, M. a HOREJŠ, O. Volumetric measurement of five-axis machine tool thermal deformation using an MT-Check [online]. In: Special Interest Group Meeting: Thermal Issues 2016. Special Interest Group Meeting: Thermal Issues 2016. Praha, 17.03.2016 - 18.03.2016. Cranfield, Bedfordshire: euspen. 2016, Dostupné z: <http://www.euspen.eu/events/special-interest-groupmeeting-thermal-issues/>
- [16] OKÉNKA, M. a Morávek M., a kol. Evaluation of standard compensation of thermal distortion caused by rotating spindle on volumetric measurement of a floor type machining centre. In: Laser Metrology and Machine Performance XII. Laser Metrology and Machine Performance XII. Renishaw Innovation Centre, UK, 15.03.2017 - 16.03.2017. Cranfield, Bedfordshire: euspen. 2017, ISBN 978-0-9566790-9-3.
- [17] RUIJL, T. Precision temperature measurement in precision equipment.: Koninklijke Philips Electronics N.V., Zurich: 2008. Tutorial. 74 s.

- [18] MORÁVEK, M. a kol. Set of geometric errors evaluation based on R-test measurement. In: MM Science Journal, 2019, no. 1, [v tisku]. ISSN: 1805-0476.
- [19] MORÁVEK, M. Vliv konfigurace obráběcího stroje na jeho prostorovou geometrickou přesnost. In: Studentská tvůrčí činnost, sborník 2011. Konference Studentské tvůrčí činnosti STČ 2011. Praha, 29.03.2011. Praha: ČVUT v Praze, FS. 2011, s. 1-7. ISBN 978-80-01-04796-5. Dostupné z: <http://www.rcmt.cvut.cz>
- [20] MORÁVEK, M. Determination of volumetric errors using a machine tool model employing a reduced set of geometric errors. In: Conference Proceedings Volume 2. 14th International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology. Dubrovnik, 02.06.2014 - 06.06.2014. Cranfield, Bedfordshire: euspen. 2014, s. 327-330. ISBN 978-0-566790-3-1.
- [21] SVOBODA, O. Prostorová přesnost frézovacích center při tepelně neustálených stavech. Praha, 2007. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [22] GANDER, W. GOLUB, G.H. a STREBEL, R. Least-Squares Fitting of Circles and Ellipses. In: BIT Numerical Mathematics. Springer, 1994.
- [23] RENISHAW. renishaw.cz. In: Online instructions for using QC20-W and QC10 ballbar systems [online]. 20. Prosinec. 2017 [cit. 2017-Prosinec-20]. Dostupné z: <http://renishaw.cz/media/exe/en/62a5c852d8d94a8c8a84780f247cbbfc.zip>
- [24] ČSN ISO 230-6:2003 Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 6: Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn (Zkouška diagonálního přestavení). ICS 25.080.01, Praha: ÚNMZ, říjen 2003.
- [25] ŠVÉDA, J., MORÁVEK, M. a kol. DV#9 (2012) Návrh řady integrovaných odměřování pro měření geometrie a deformace mechanické struktury obráběcího stroje. Výzkumná zpráva č. V-12-045. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení, 2012, 76 s.
- [26] ŠVÉDA, J., MORÁVEK, M. a kol. Technologie měření volumetrické přesnosti celého pracovního prostoru obráběcího stroje včetně výpočtových modelů pro 5 os. Výzkumná zpráva č. V-15-054. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení. 2015. 52 s.

[27] ČSN ISO 230-3:2007, Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 3: Určení tepelných vlivů. ICS 20.080.01, Praha: ÚNMZ, říjen 2010.

Anotace

Předložená disertační práce se zabývá výzkumem přesnosti pětiosých frézovacích strojů. Na základě provedené rešerše současného stavu řešené problematiky jsou vytyčeny cíle disertační práce. V rámci vytyčených cílů je navržena metoda pro rychlé a efektivní měření volumetrické přesnosti pracovního prostoru malých a středně velkých pětiosých frézovacích strojů. Metoda je navržena s ohledem na využitelnost měření při teplotně neustálených stavech. Navržená metoda je aplikována při měření volumetrické přesnosti pracovního prostoru vybraného pětiosého frézovacího stroje. Na základě získaných výsledků z realizovaných měření je identifikována míra zjednodušení v případě konvenčního přístupu měření tepelného chování OS dle standardu ISO 230-3. Rovněž je diskutována praktická využitelnost navržené metody. Předložená disertační práce se dále zabývá návrhem postupu pro rychlé proměření a následné vyhodnocení souboru základních geometrických odchylek pětiosých frézovacích strojů. Navržený postup je experimentálně ověřen na dvojici pětiosých frézovacích strojů. Výsledky získané pomocí navrženého postupu jsou verifikovány porovnáním s výsledky měření a vyhodnocení získanými na základě uplatnění konvenčních metod měření.

Summary

The presented doctoral thesis deals with the research of accuracy of five-axis milling machines. Based on the research of the current state of the art, the goals of the doctoral thesis are set out. Within the outlined goals, a method for fast and effective measurement of the volumetric accuracy of the whole working space of small and medium-sized five-axis milling machines is proposed. The method is designed with regard to the usability of measurements in temperature nonstable states. The proposed method is applied on the measuring the volumetric errors of the whole working space of the selected five-axis milling machine. Based on the results obtained from the realized measurements, a simplification rate is identified in the case of a conventional approach to measuring the thermal behaviour of the machine tool according to the ISO 230-3 standard. The practical applicability of the proposed method is also discussed. The presented doctoral thesis also deals with the design of a procedure for fast measurement and evaluation of the set of basic geometric errors of the five-axis milling machines. The designed procedure is experimentally verified on a pair of five-axis milling machines. The results obtained using the designed procedure are verified by comparing with the measurement and evaluation of results obtained using conventional measurement methods.

