

OPONENTNÍ POSUDEK

disertační doktorské práce

Ing. Martina Morávka

„Výzkum přesnosti pětiosých CNC frézovacích center“

K posouzení byla předložena disertační práce Ing. Martina Morávka vypracovaná na školícím pracovišti Ústav výrobních strojů a zařízení Ú-12135, Fakulty strojní ČVUT v Praze pod vedením školitele doc. Ing. Pavla Bacha, CSc. a školitele specialisty Ing. Otakara Horejše, Ph.D. ve vědním oboru Konstrukční a procesní inženýrství. Práce má rozsah 133 stran a je rozdělena do 8 kapitol doplněných seznamem literatury k dané problematice, přehledem publikací autora týkajících se problematiky řešené v disertační práci a přílohami. Práce se zabývá aktuální problematikou identifikace přesnosti pětiosých CNC frézovacích strojů při teplotně neustáleném stavu.

Součástí oponované disertační práce je také přehled publikovaných prací disertanta, ve kterém je uvedeno celkem 13 příspěvků vztahujících se přímo k disertační práci (odborné publikace a výzkumné zprávy). Dále jsou uvedeny odkazy na dalších 26 autorových publikací z výrobních strojů. Z celkového počtu uvedených publikací je disertant ve 13 případech hlavním nebo samostatným autorem. Vzhledem k bohaté publikační činnosti disertant splňuje požadavky na prezentaci výsledků výzkumné práce.

V kap. 2 se autor věnuje popisu současného stavu problematiky v oblasti volumetrické přesnosti pětiosých frézovacích strojů. V úvodu zmiňuje přehled příslušných norem a dále se poměrně detailně věnuje metodám měření přesnosti geometrických chyb strojů. V kapitole by bylo ale přínosné některé metody trochu více upřesnit, např. u měření pomocí laserového interferometru se nevyužívá pouze principu měření času spolu s vlnovou délkou, ale také čítání interferometrických proužků a laser trackery je možné využít stejně jako laser tracery – stejný princip měření. Samostatnou část kap. 2 tvoří popis principu modelování geometrických chyb využívající transformačních matic (HTM). Vzhledem k tomu, že se jedná o univerzální popis vhodný pro tuto aplikaci, je zde jejich využití věnována odpovídající pozornost. Další částí kapitoly je nástin softwarových kompenzací popisující možnosti implementace do řídicích systémů Siemens a Heidenhain. Jsou zde však zmíněny jen základní lineární a nelineární kompenzace, volumetrické kompenzace zde zmíněny nejsou (Siemens VCS a Heidenhain KinematicsComp), i když se k nim autor později v textu disertační práce vyjadřuje. Autor také popisuje možnost zasílání kompenzace pomocí DNC, která však není real-time a je tak nutné s ní zacházet. Dále zmiňuje komunikaci pomocí I++ serveru, která však není přímo určena pro zasílání kompenzace do stroje, ale pouze jako nástroj pro komunikaci s metrologickým softwarem. V závěru kapitoly je zmíněn vliv teplotního chování na volumetrickou přesnost a je uveden shrnující popis současného stavu řešené

problematiky. Uvedené poznámky oponenta se týkají pouze detailů, celkově je kapitola dobře a přehledně zpracována a tvoří dobrý základ disertační práce.

Cíle disertační práce autor stanovuje v kap. 3 a logicky vychází z výsledků provedené rešerše. Disertant zde zmiňuje, že problematika volumetrické přesnosti s přímým propojením na teplotní deformace je v současné době řešena jen velmi okrajově, s čím oponent souhlasí a zdůrazňuje tak důležitost řešeného tématu. Cílem práce je navrhnout metody pro rychlé a efektivní měření volumetrické přesnosti, následně navrhnout postup pro rychlé proměření a vyhodnocení základních geometrických odchylek a experimentálně navržený postup ověřit.

V kap. 4 autor shrnuje zejména HW nástroje pro testování volumetrické přesnosti pětiosých strojů. Za velmi přínosný považuje oponent návrh měřicí aparatury umožňující rotaci vřetene, která je důležitá z hlediska výzkumu vlivu teplotního chování na přesnost strojů. Velice zajímavé je také využití měřících artefaktů a termostabilních modulárních rámu nesoucích kalibrační koule. Autor zde uvádí i testování rámu při teplotním zatěžování, nicméně pouze v axiálním směru (identifikovaná teplotní roztažnost $2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Radiální deformace však může zanechat do měření také velkou chybu. Z toho plyne i jedna z otázek oponenta. V kapitole je dále uveden sběr a zpracování dat z měření, které využívá NI cRio jako hlavní jednotky pro záznam dat z řídicího systému a přídavných snímačů a vlastní program pro vyhodnocení vytvořený v Matlabu. Pro komunikaci s ŘS je zvolena sběrnice Profibus, která však vyžaduje zásah do řídicího systému ve smyslu hardwarové konfigurace. Otázkou je, zda by nebylo možné využít i jiné komunikační sběrnice.

V kap. 5 se autor věnuje aplikaci navržené metody na měření změny volumetrické přesnosti při teplotně neustáleném stavu stroje MCU 630. Kapitola je zpracována velmi podrobně i se zhodnocením naměřených dat a získání zdrojových dat muselo být extrémně časově náročné. Otázkou však je, zda měření ve vybraných bodech dává dostatečnou informaci o celkové změně volumetrické přesnosti v celém pracovním prostoru. Nicméně pro testování změny přesnosti stroje ve vybraných bodech pracovního prostoru je navržená metoda velice efektivní a je vhodná pro sledování při teplotním zatěžování stroje.

Kap. 6 je zaměřena na vývoj postupu pro měření a vyhodnocení souboru geometrických odchylek. Jedná se o základní a významné odchylky – odchylky pozice a orientace středů otáčení rotačních os a dále odchylky kolmosti lineárních os. Zbylými odchylkami se autor nezabývá a předpokládá, že ostatní chyby výrazně neovlivní identifikaci základních odchylek. Současně je v kapitole popsán model volumetrické chyby stroje vycházející z transformačních matic a využívající samostatných chyb jednotlivých os stroje. Model je sestaven pro stroje MCU 700 a MU 6300, kdy hodnoty uvažovaných geometrických odchylek jsou převzaty pro potřeby simulace z obdobných strojů.

V kap. 7 je potom navržený postup měření a vyhodnocení souboru geometrických odchylek reálně testován na výše uvedených strojích, což považuji za velice přínosné. V závěru kapitoly jsou navíc uvedeny také výsledky identifikace těchto geometrických odchylek při teplotním zatěžování stroje, což dobře dokresluje použití celé metody. Velice zajímavé by bylo mít identifikované základní geometrické odchylky na stroji MCU 630 při teplotním zatěžování popisovaném v kap. 5. Nicméně při prokládání kružnic a přímků nutných pro identifikaci středů rotačních os a kolmosti lineárních os (obr. 93 až obr. 96) dochází ke značnému zkreslení, které by mohlo mít vliv na získané výsledky

(tvary si sobě nejsou podobné). Otázkou je, zda je prokládána pouze odchylka, jak je naznačeno na obr. 93 až obr. 96 nebo celkový tvar zatížený odchylkou. V kapitole jsou následně identifikované základní geometrické odchylky zavedeny do matematického modelu stroje vytvořeného v kap. 6 a výsledky simulované chyby a přímo naměřené porovnány. U stroje MCU 700 je z výsledků patrné, že naměřená a simulovaná odchylka (reálné hodnoty základních geometrických odchylek dosazených do matematického modelu) odpovídají, nicméně u stroje MU 6300 je tato shoda o něco horší.

Hlavní předností této disertační práce je její komplexnost, která přináší kombinovaný pohled na volumetrickou přesnost v kombinaci s teplotním chováním obráběcího stroje. Jako velice přínosné považuji jak vývoj vlastního HW zařízení a SW pro testování volumetrické přesnosti, tak i testování na vybraných strojích. Disertační práce tvoří základ pro vývoj v oblasti přesnosti pětiosých obráběcích strojů.

Disertant plně prokázal své schopnosti samostatně řešit závažný technický problém v širokém spektru problematiky jak na teoretické úrovni, tak při jeho praktickém řešení. Tím disertant prokázal svoji schopnost vědecky pracovat.

V předložené práci jsem neshledal žádné věcné ani formální chyby. Z disertační práce je patrný odpovědný přístup školícího pracoviště a obou školitelů. Práce je přehledně členěna a je vypracována s velikou pečlivostí a odpovídá svoji formou i obsahem nárokům na tento druh prací.

Dotazy:

- Jak je zajištěna souosost měřicího zařízení MT-Check s osou vřetene v případě umístění na navržený vřetenový přípravek zobrazený na obr. 32. Tato souosost bude důležitá při obecných pohybech os A a C při současném držení polohy koule vůči měřicímu zařízení.
- Jakých hodnot může nabývat chyba termostabilního rámu v radiálním směru při teplotním zatěžování? Na obr. 36 jsou zobrazeny poměrně dlouhé části rámu, jejichž minimální úhlová deformace může způsobit výraznou chybu polohy kalibrační koule vůči stolu.
- Při testování navržené metody měření v kap. 5 byla měřena změna polohy kalibračních koulí v diskrétním bodě nebo byla s každou kalibrační koulí „projeta trajektorie“? Je změna polohy měřena v několika bodech vypovídající z hlediska volumetrické chyby celého pracovního prostoru?
- Nebude při identifikaci základních geometrických odchylek (odchylky pozice a orientace středů otáčení rotačních os a dále odchylky kolmosti lineárních os) uvedené v kap. 6 docházet k ovlivnění výsledků ostatními odchylkami, např. chybami přímosti lineárních os atd.
- Je při hledání odchylek pozice a orientace středu otáčení zobrazené na obr. 93 – obr. 96 prokládána pouze odchylka (jak je naznačeno na obr.) nebo celkový tvar zatížený odchylkou? Kruhový tvar odchylky zobrazené např. na obr. 93 by totiž mohl být daný nesouhlasem polohy osy vřetene a měřicího zařízení MT-Check.
- Co může způsobit velký rozdíl vypočtené a naměřené odchylky na obr. 100 až obr. 102? Je to způsobeno tím, že ostatních 30 neidentifikovaných odchylek má významný vliv na celkovou přesnost?

Závěr:

Práce disertanta přispívá k řešení aktuální problematiky. Při řešení práce autor použil odpovídajících moderních postupů a metod. Disertantovi se podařilo splnit vytyčené cíle a přispět k rozvoji použitých metod i celého oboru.

Domnívám se, že disertační práce „Výzkum přesnosti pětiosých CNC frézovacích center“ doktoranda Ing. Martina Morávka odpovídá požadavkům na udělení vědecko-pedagogického titulu Ph.D. a práci doporučuji k obhajobě.

V Praze 10.12.2018

Ing. Jiří Švéda, Ph.D.