



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ
A ROBOTIKY

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

**Predikování vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic
obráběcích strojů**

Prediction of selected parameters of rotational kinematic pairs of machine
tools

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Tomáš Marek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

Brno 2019

KLÍČOVÁ SLOVA

geometrická přesnost, volumetrická přesnost, kinematické rotační dvojice, predikce

KEYWORDS

geometric accuracy, volumetric accuracy, rotational kinematic pairs, prediction

Obsah

1 ÚVOD	4
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	5
3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	8
4 METODIKA PRO PREDIKOVÁNÍ VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ ROTAČNÍCH KINEMATICKÝCH DVOJIC PRO OBROBEK U CNC OBRÁBĚCÍCH STROJŮ	9
5 PŘÍPADOVÉ STUDIE PREDIKCE VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ ROTAČNÍCH KINEMATICKÝCH DVOJIC	17
5.1 Pětiosé obráběcí centrum DMU 75 monoBlock®	17
5.2 Predikce vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic CNC obráběcích strojů pro obrobek	21
6 PŘÍNOS DIZERTAČNÍ PRÁCE	24
7 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÉHO CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	25
8 ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ	25
8.1 Doporučení pro vědecký rozvoj a výuku	25
8.2 Doporučení pro praxi	26
9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	28
10 ŽIVOTOPIS	29

1 ÚVOD

Role obráběcích center a multifunkčních obráběcích center je ve strojírenské výrobě nezastupitelná. Požadavky, na které by se měli výrobci obráběcích strojů zaměřovat, aby uspěli ve velké konkurenci výrobců, jsou: [1]

- nasazení produktivních řezných nástrojů
- zvyšování přesnosti obrábění;
- zvyšování stupně automatizace;
- vysoká dynamická stabilita.

Obráběcí stroje pro třískové obrábění, zejména pak obráběcí a multifunkční obráběcí centra jsou pro rozvoj globálního hospodářství rozhodujícím výrobním prostředkem. Je to dáno zejména tím, že:

- na všech předmětech kolem nás je vidět jejich stopa, protože by bez jejich činnosti nemohly vzniknout (formy na spotřební elektroniku, tvářecí nástroje pro výrobu karoserií automobilů, nástroje a stroje pro dřevoobráběcí stroje....);
- umí reprodukovat (vyrobit) sám sebe;
- obráběcí stroj je univerzální výrobní prostředek;

a tím se stávají nedílnou součástí tvorby hodnoty v podobě domácího produktu. Na celkovém objemu světové produkce se podílí zhruba ze 70 % obráběcí a z 30 % tvářecí stroje. V současné době se zásadním způsobem změnilы podmínky pro výrobu, vývoj a následný prodej obráběcích strojů. Vše je velmi dynamické a vyžaduje to přizpůsobení rychle se měnícím vnějším podmínkám – obr. 1. Jak je znázorněno na obr. 1 ovlivňují vznik ideálního obráběcího stroje (v obrázku reprezentován ideálním kruhem) tři vnitřní a tři vnější faktory [1].

Vnitřní faktory jsou:

- kvalita produktu;
- cena;
- čas;

Vnějšími faktory:

- soutěž;
- trh;
- okrajové podmínky (ekologie, normy, produkt).

Tyto faktory svým působením způsobují odchylky reálného stroje od ideálních představ, což si v obrázku můžeme představit jako deformaci ideálního kruhu do jiného tvaru (např. nepravidelné elipsy).

Jak dokáže být firma agilní, tak bude v otevřené konkurenci úspěšná. Stává se velmi často, že výrobní firmy, a to i světového formátu, podceňují zejména vnitřní faktory související s kvalitou vzniku obráběcího stroje.

Může to být mimo jiné tím, že nevynaložily finanční prostředky pro kontrolu kvality obráběcího stroje zejména v jeho hmotné fázi realizace (výroba a montáž). Později při finálním dokončování stroje se stává, že tento neplní svoji funkci a nevykazuje atributy přesnosti, na jaké byl projektován konstruktéry. Je to z velké části dáno tím, že byly montovány neshodné díly a to ještě způsobem, kdy nebyla procesně kontrolována přesnost jednotlivých skupin, protože neexistoval HW (měřicí zařízení) a SW (pro tyto měřicí zařízení), který by toto měření umožňoval. Chyběla metodika a systém kontroly.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Neustálé se zvyšující požadavky na vlastnosti (výkonost, přesnost, tuhost statická i dynamická) obráběcích strojů vede výrobce k jejich neustálému zlepšování. Chceme-li, aby tyto obráběcí stroje splňovaly požadavky vyšší přesnosti, tuhosti a výkonosti, je potřeba zamezit deformacím a chvěním jednotlivých dílů nejen u rotačních dvojic, ale i u celého obráběcího stroje. Nerespektování těchto požadavků se projeví na finálním produktu, tedy na obrobene součásti.

Proto výrobci stále hledají možnosti zvyšování statické a dynamické tuhosti při současném zachování pracovní přesnosti. Při zvyšování geometrické přesnosti nesmí být snižována mechanická přesnost. Hledáme koncepci pro zvyšování jak mechanické, tak i softwarové geometrické přesnosti. Proto musíme umět popsat chování těchto os (rotačních i translačních kinematických dvojic) a následně nalézt postup správného měření a aplikování korekcí z těchto měření do řídicího systému stroje.

Na obráběcí stroj je nutné pohlížet jako na technickou soustavu, kterou je nutné vždy posuzovat komplexně, se všemi účinky na ni působící. Při provozu působí na CNC obráběcí stroj řada vlivů. Tím rozumíme působení nejen okolí, kde je instalován, ale také vliv obsluhy na stroj samotný, i jeho působení na okolí. Tyto vlivy se podepisují na vlastnostech, po kterých všichni uživatelé obráběcích strojů volají, tedy stabilitě chodu, opakované přesnosti obrábění a bezporuchovosti. Obráběcí stroje musíme posuzovat komplexně, hierarchicky a strukturovaně. Odchytky rozměrů opracovávané součásti podávají uživateli přímou informaci o přesnosti dílů, ze kterých je stroj smontován, o pečlivosti montáže a v neposlední řadě o jeho konstrukčním provedení. Dílenské prostředí, kde je stroj instalován, působí na obráběcí stroj [2]:

- vibracemi;
- nečistotami;
- teplem.

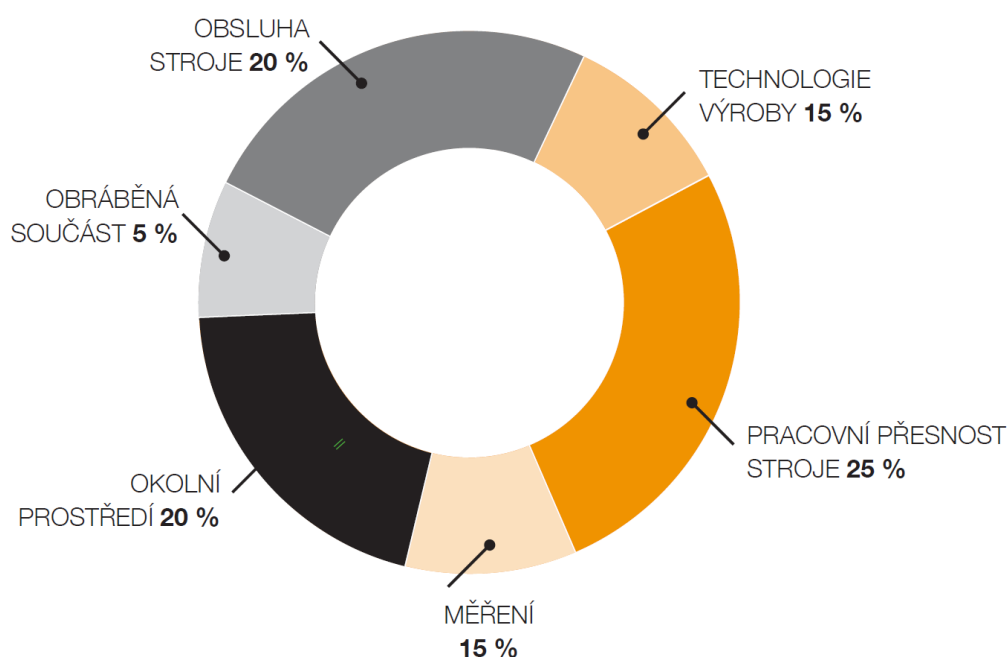
Stejnými vlivy může stroj naopak působit na okolí. Stroj může způsobovat vibrace (není to běžné), zplodiny vznikající při přívodu chladicí a řezné kapaliny k místu řezu, a také může způsobovat oteplování okolí. Nečistotou nemyslíme hrubou nečistotu a nadměrnou prašnost, ale standardní prostředí běžného dílenského provozu.

Proudění a sálání tepla z okolí má bezprostřední vliv na místo instalace stroje a může nepříznivě ovlivnit provoz stroje. Chlad anebo náhlé změny teploty působí stejně nepříznivě. V případech, pokud to bezprostředně nebrání provozu stroje (např. vypadávání teplotní ochrany, funkčnost pohybových mechanismů) a teplotní změny (náhlý rozdíl teploty) nejsou příliš velké, lze stroj uspokojivě provozovat. Tento stav můžeme přirovnat k teplotně ustálenému stavu (temperovanému stavu). Proto výrobci většinou uvádí rozsah teplot, za kterých jejich stroj pracuje. Spíše škodí náhlá změna teplotního pole. Kromě tohoto vnějšího působení má na provoz a zejména pak jeho přesnost obrábění vliv několik dalších činitelů označovaných souhrnně jako přesnost výroby (nejistota výroby). Při obrábění určitého obrobku v čase kolísá jeho rozměr v daných a povolených mezích, anebo mimo ně.

Kolísání rozměru obrobku způsobují tři hlavní faktory působící na obráběcí stroj a výrobní proces [2]:

- teplotní vliv;
- statická tuhost soustavy stroj – nástroj – obrobek;
- dynamická poddajnost soustavy stroj – nástroj – obrobek.

Budeme – li zkoumat vlivy působící na přesnost výroby, pak všechny působící vlivy, nazývané též někdy nejistota výroby souhrnně ukazuje obr. 1 z literatury [2].



Obr. 1 Vlivy působící na přesnost výroby CNC obráběcího stroje [2]

Mezi mnoha ukazateli technické úrovně obráběcích strojů má důležité postavení jejich přesnost. Přesnost obráběcího stroje je vlastnost, která charakterizuje schopnost stroje vyrobit součást v požadovaném rozměru a tvaru s dodržáním požadovaných tolerancí a drsností povrchu [3],[4]. Přesnost strojů je určena přesností jeho jednotlivých součástí a uzlů.

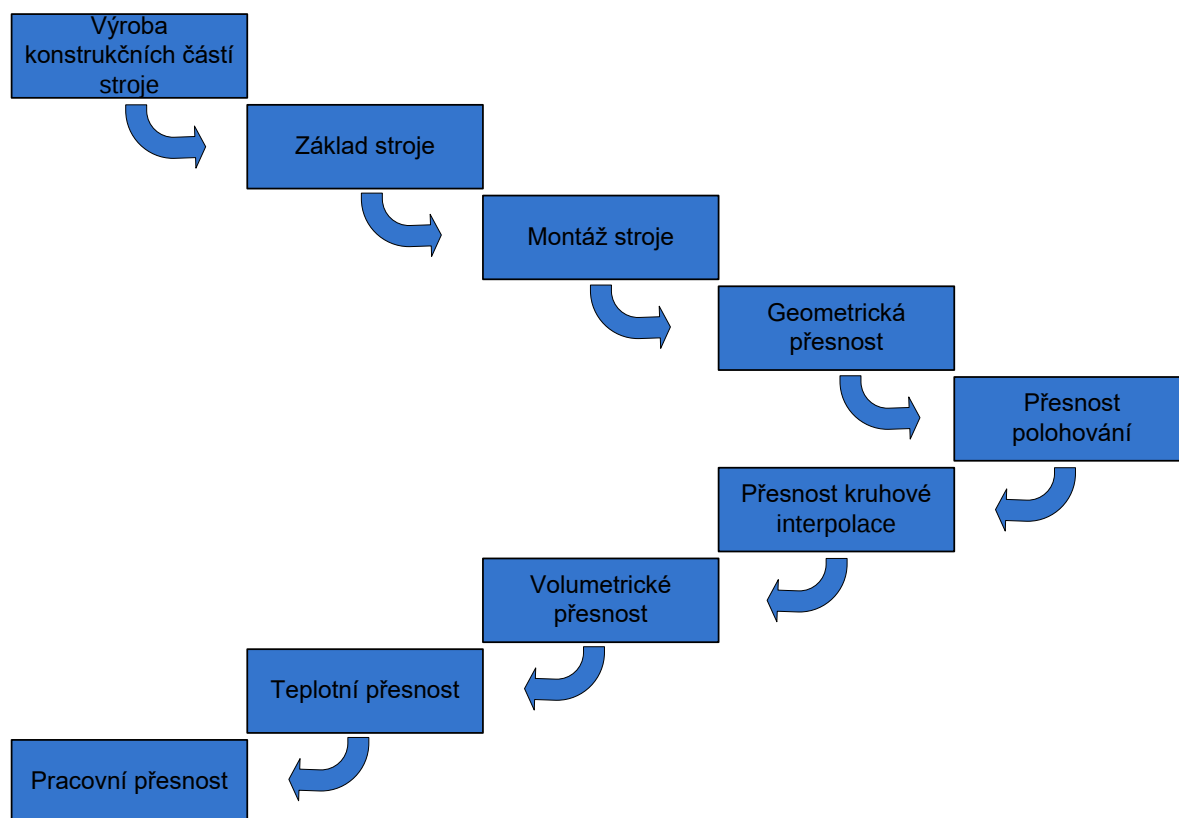
V obráběcím stroji můžeme rozeznat a měřit následující přesnosti:

- geometrickou;
- polohování;
- kruhové interpolace;
- volumetrickou;
- pracovní, související s obrobením obrobku.

Tyto přesnosti obráběcích strojů a zejména pak pracovní přesnost obráběcího stroje velmi významně ovlivňují dva vlivy a sice:

- teplotní vlivy projevující se v teplotní stabilitě obráběcího stroje;
- vibrace.

Nejsou to však pouze výše zmíněné přesnosti, které zasahují do výsledné přesnosti obrobku. Lze říci, že základním prvkem pro přesný obráběcí stroj je přesná výroba jeho jednotlivých částí. Dalším důležitým prvkem je základ, na kterém bude stroj smontován a užíván. Detailní znalost konstrukce základu a důležitých uzlů stroje pak napomáhá ve volbě nejvhodnějšího postupu seřizování. Každý obráběcí stroj, který je postaven na více než 3 opěrných bodech, by měl, s ohledem na správnou funkci, mít přiměřený základ. Požadavek kotvení se týká především větších a velkých strojů, jako jsou portálové frézky, vyvrtávačky, větší soustruhy a karusely, velká obráběcí centra atd. Kotvení vyžadují např. i některé konstrukce menších frézovacích center, např. těch v uspořádání s křížovým stolem, kde může těžší obrobek způsobit při přejíždění stolu překroucení celého lože [5]. Výše zmíněné přesnosti na sebe navazují a nelze předpokládat, že např. špatnou geometrickou přesností lze dosáhnout požadované pracovní přesnosti. Jak tyto na sebe navazují, ukazuje obr. 2.



Obr. 2 Návaznost přesností u obráběcích strojů

Obr. 2 popisuje obráběcí stroj s lineárními osami. V případě, že se na stroji vyskytují rotační osy, tak je nejdříve nutné zkontrolovat lineární osy a až poté přichází na řadu kontrola rotačních os. U těchto se také kontroluje přesnost geometrická, polohování, volumetrická. Pokud jsou všechny přesnosti v požadovaných tolerancích, může se přistoupit k přesnosti pracovní, která souvisí s obrobením pracovního kusu. Jednotlivé přesnosti jsou popsány v následující části práce.

3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Konstrukce obráběcích a tvářecích strojů jako produktu je do značné míry závislá na subdodávce z široké oblasti dalších průmyslových oborů, jako je elektronický a elektrotechnický průmysl, kontrolní a měřicí technika, výpočetní technika. Tím stále více roste význam post-procesní, in-procesní a predikční kontroly stavu a kondice strojů. Na základě predikční kontroly lze ovlivňovat zejména atribut kvality tvorby produktu patřící do vnitřních faktorů.

Cílem dizertační práce je návrh metodiky pro predikci vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic obráběcích strojů. Metodika bude brát v úvahu dostupnost vhodné měřicí techniky, popis konstrukčního provedení rotačních kinematických dvojic.

Tato metodika bude využitelná pro:

- predikci chování rotačních kinematických dvojic a to také již ve fázi konstrukce CNC obráběcího stroje tím, že konstruktér bude tyto aplikovat do konstrukce stroje;
- plánování strategie měření pro konkrétní kinematiku rotační dvojice;
- posouzení správnosti výsledků;
- aplikování kompenzace pro konkrétní kinematiku.

4 METODIKA PRO PREDIKOVÁNÍ VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ ROTAČNÍCH KINEMATICKÝCH DVOJIC PRO OBROBEK U CNC OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

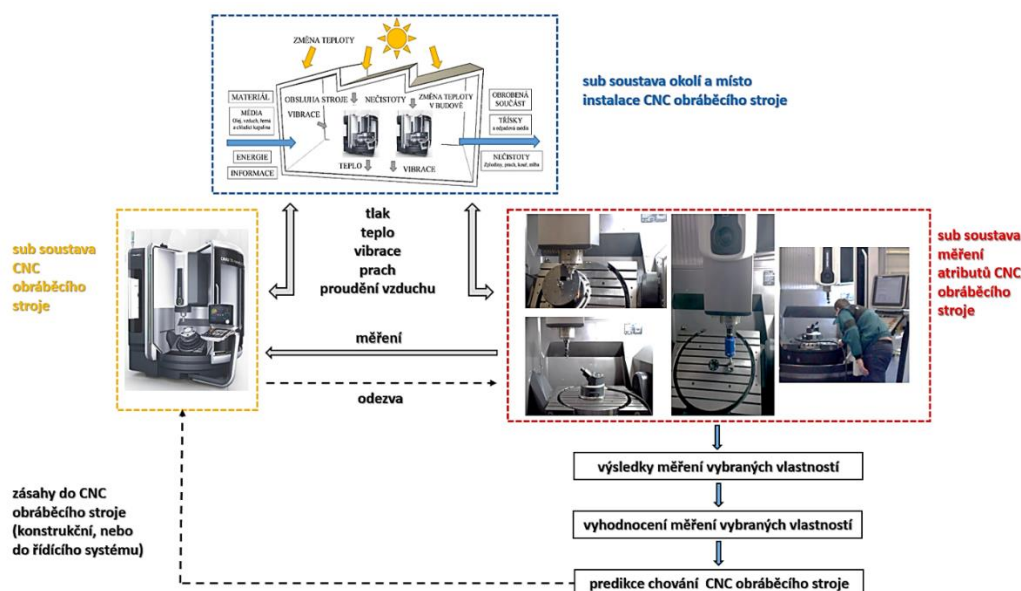
Předložená práce je zpracována tak, že je nejdříve pomocí systémového přístupu sestavena metodika pro predikci chování rotační kinematické dvojice u CNC obráběcích strojů, plánování strategie měření a ověření správnosti výsledků včetně aplikací pro konkrétní provedení kinematického řetězce vybraného stroje.

Na základě tohoto systémového přístupu a z něj vyplývající metodiky bude provedeno měření rotační kinematické dvojice obráběcího stroje. Výsledky systémového přístupu a měření jsou zobecněny do podoby doporučení pro konstruktéry obráběcích center, umožňující zvýšení přesnosti rotační kinematické dvojice.

Plánování strategie měření, vlastní měření, posouzení správnosti výsledků bude provedeno na zapůjčeném stroji DMU 75 monoBlock firmou DMG MORI Czech.

Metodou, tedy popisem postupu doporučující určité techniky a nástroje k predikci vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic pro obrobek u CNC obráběcích strojů, je pro nás systémový přístup s jeho atributy.

Metodikou je potom algoritmus metody (posloupnost činností), tedy postup stanovující, jak aplikovat konkrétní metodu predikce vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic pro obrobek u CNC obráběcích strojů při respektování výše uvedených systémových atributů. Hrubé schéma metodiky můžeme znázornit na obr. 3. Vedlo by ke značné nepřehlednosti, pokud bychom zde znázornili všechny detaily. Tu uvedeme podrobně v následujícím textu této kapitoly.



Obr. 3 Hrubé znázornění metodiky pro predikci vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic pro obrobek

Struktura metodiky pro predikci vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic pro obrobek u CNC obráběcích strojů je uveden v následujícím textu.

A. *Kontrola sub soustavy okolí a místo instalace CNC obráběcího stroje (podmínky prostředí).*

Kontrola sestává z následujících činností:

- ověření jakosti a integrity měřeného povrchu (zbavení se mastnoty a nečistot) v případě měření na měřené části CNC obráběcího stroje;
- kontrola tlaku a vlhkosti vzduchu a teploty okolí v místě instalace CNC obráběcího stroje;
- kontrola úrovně vibrací v místě instalace CNC obráběcího stroje;
- kontrola prašnosti v místě instalace CNC obráběcího stroje;
- kontrola ustálenosti proudění vzduchu v místě instalace CNC obráběcího stroje.

B. *Výběr měřené přesnosti rotačních kinematických dvojic pro obrobek u CNC obráběcího stroje.*

V první řadě bude zjištěno, zda na stroji proběhla již nějaká SW úprava (kompenzace jakéhokoli druhu) jeho některých parametrů či nikoliv. Dále zda je tato kompenzace aktivní či nikoliv. Poté si stanovíme, zda budeme provádět měření:

- a) geometrické přesnosti;
- b) přesnosti polohování;
- c) volumetrické přesnosti;
- d) pracovní přesnosti.

C. Kontrola sub soustavy CNC obráběcího stroje (podmínky provozování a jeho stav).

Kontrola sestává z následujících činností:

- ověření funkčnosti CNC obráběcího stroje;
- kontrola otevřenosti (přístupu) SW řídicího systému CNC obráběcího stroje a jeho nastavení pro měření;
- kontrola temperování měřeného CNC obráběcího stroje;
- kontrola teploty měřeného CNC obráběcího stroje.

D. Prováděcí plán měřicího procesu sub soustavy pro měření atributů CNC obráběcího stroje (D_1), včetně vlastní realizace měření (D_2).

Prováděcí plán měřicího procesu sestává z následujících činností:

- stanovení strategie měření sestává z:
 1. volby měřicího přístroje;
 2. nastavení rozsahu měření;
 3. nastavení koeficientu roztažnosti odměřovacích pravítek;
 4. nastavení SW přístroje (volba určitého parametru např. kinematiky stroje, kterou má měřit);
 5. odhad nejistoty měření;
 6. rozmístění kontrolních senzorů;
 7. rozmístění snímačů měřidel;
 8. umístění vlastního měřidla;
 9. postupu měření;
 10. časového hlediska – doby měření;
- zjištění, zda jsou potřebné měřicí přípravky a jejich zajištění;
- temperování měřicí aparatury;
- kalibrace měřidel.

E. Vyhodnocení a analýza naměřených dat.

Vyhodnocení a analýza naměřených dat se stává z:

- interpretace výsledků měření.

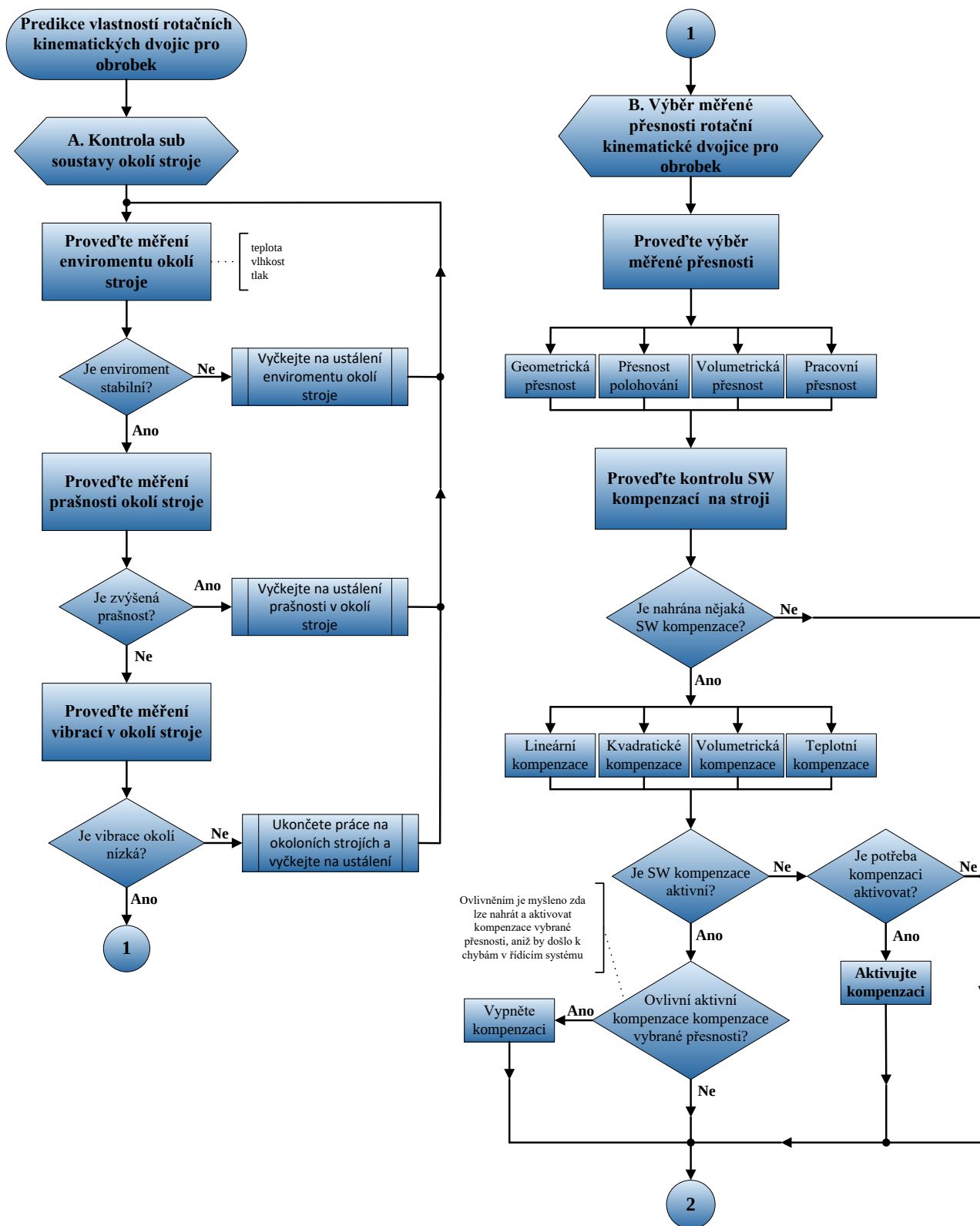
Interpretací výsledků měření rozumíme zvážení, zda roční období, kdy bylo provedeno měření, nehraje zásadní roli pro zamýšlenou udržitelnost případných SW zásahů (kompenzací). V případě, že usoudíme, že má toto zásadní vliv, pak je nutné provést měření a tím i zásahy pro každé roční období zvlášť, protože je charakterizováno jiným projevem, zejména teplotním. Jde především o změnu vnějších teplotních podmínek, tedy vně budovy haly, kde je stroj instalován.

F. Predikce vybraných vlastností rotačních os CNC obráběcího stroje.

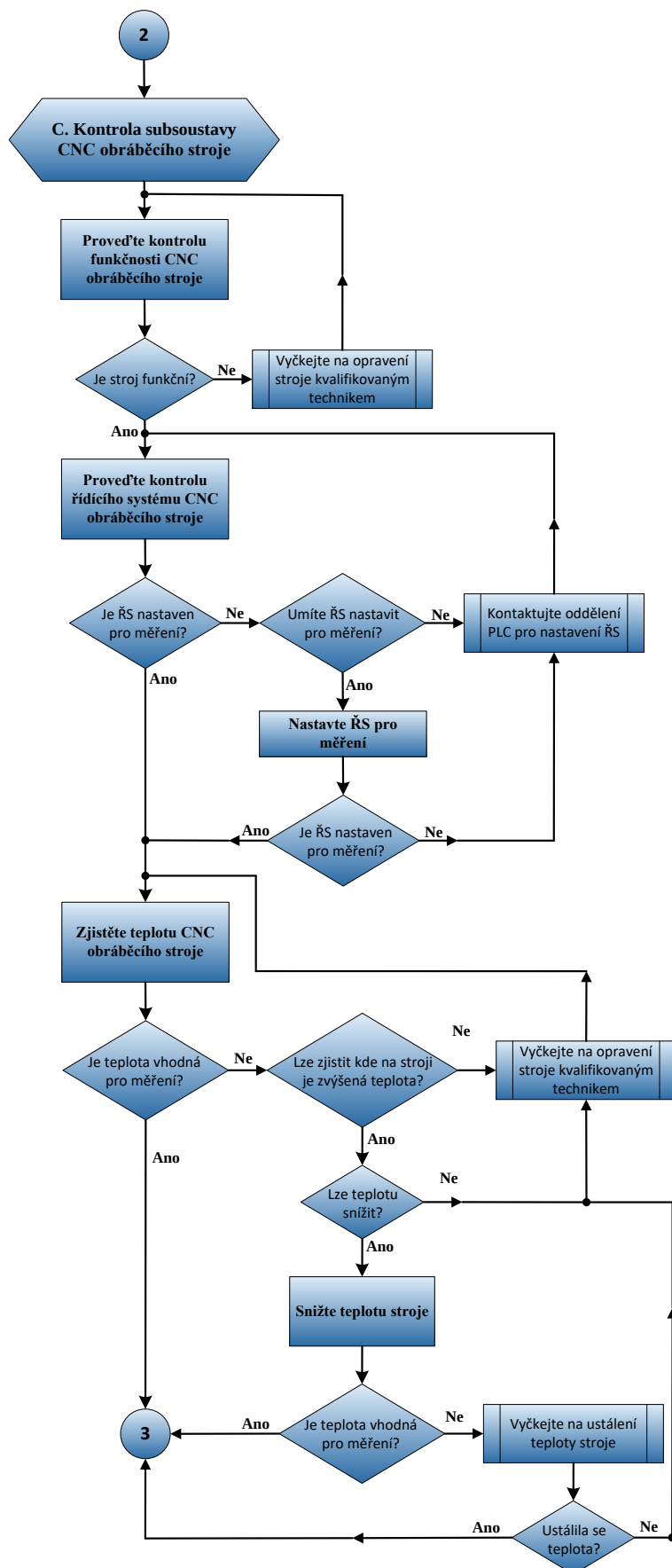
Predikce vybraných vlastností rotačních os CNC obráběcího stroje sestává z:

- interpretace výsledků měření do predikce vlastností rotačních os bez zásahu do jejich konstrukčního provedení;
- interpretace výsledků měření do predikce vlastností rotačních os se zásahem do jejich konstrukčního provedení;
- interpretace výsledků měření do predikce vlastností rotačních os s provedením mechanického zásahu.

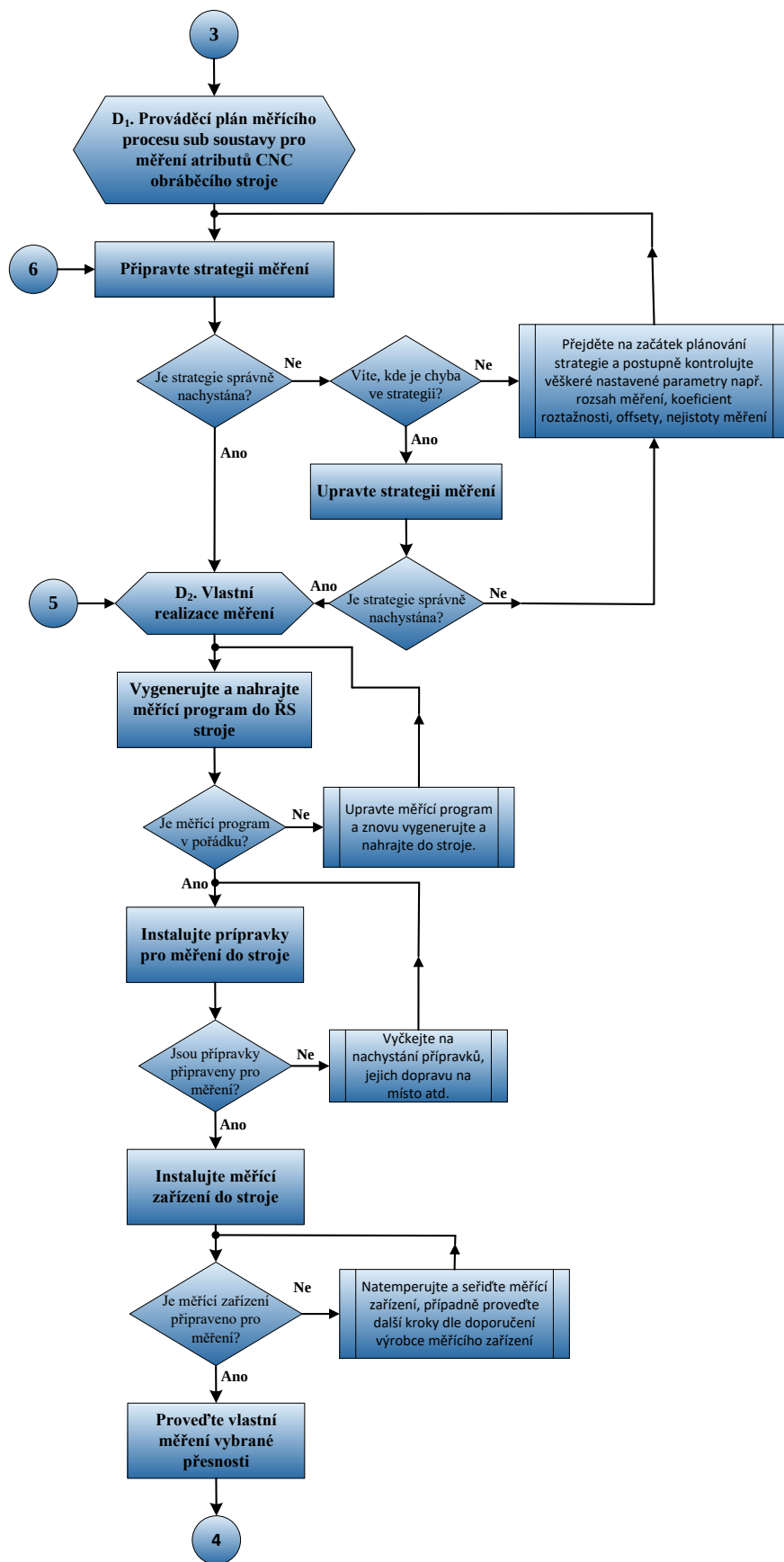
Výše popsaná metodika je formou vývojového diagramu znázorněna na obr. 4, 5, 6 a 7.



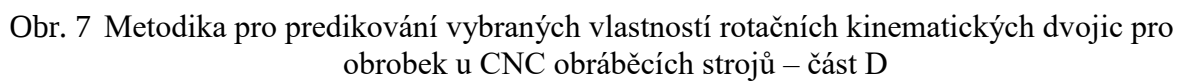
Obr. 4 Metodika pro predikování vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic pro obrobek u CNC obráběcích strojů – část A



Obr. 5 Metodika pro predikování vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic pro obrobek u CNC obráběcích strojů – část B



Obr. 6 Metodika pro predikování vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic pro obrobek u CNC obráběcích strojů – část C



5 PŘÍPADOVÉ STUDIE PREDIKCE VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ ROTAČNÍCH KINEMATICKÝCH DVOJIC

5.1 PĚTIOSE OBRÁBĚCÍ CENTRUM DMU 75 MONOBLOCK®

Pětiosé obráběcí centrum DMU 75 monoBlock (obr. 8) firmy DMG MORI má kinematickou strukturu W-C-A-Base-X-Y-Z-T (kinematika „BK“). Řídicí systém stroje je HEIDENHAIN TNC 640. Je určený pro kontinuální pětiosé obrábění. Koncepce stroje je postavena na tříosé kinematice nástroje (X,Y,Z) a otočně sklopný stůl 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 [6].



Obr. 8 DMU 75 monoBlock [DMG MORI]

A. Kontrola sub soustavy okolí a místo instalace CNC obráběcího stroje (podmínky prostředí).

Stroj DMU 75 monoBlock byl umístěn v prostorách haly ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky. Byl ustaven na vhodném základě dle doporučení výrobce. Během měření byly zavřena vrata pro vstup do haly, kvůli snížení proudění vzduchu, které bylo měřeno zařízením Testo 480 od společnosti Testo Saveris. Dále bylo zkontrolováno, zda na měřený stroj nepůsobí přímý sluneční svit. Taktéž nebyla nalezena příliš vysoká úroveň okolních vibrací a prašnosti. Sub soustava okolí stroje byla shledána jako vhodná pro provedení měření rotační kinematické dvojice stroje.

B. Výběr měřené přesnosti rotačních kinematických dvojic pro obrobek u CNC obráběcího stroje.

Bylo rozhodnuto, že bude provedeno měření volumetrické přesnosti zařízením Laser Tracer. Toto měření má výhodu v získaných informacích a možnosti kompenzace, kdežto nevýhodou je její časová náročnost a nutnost kvalifikované obsluhy.

Stroj je s řídicím systémem Heidenhain TNC 640. Na stroji bylo zjištěno, že jsou aktivní kompenzační hodnoty (od výrobce stroje) pro přesnost polohování jak lineárních, tak i rotačních os (lineární kompenzace).

Dle technické dokumentace stroje byla provedena kontrola kompenzace všech řízených os dle normy VDI/DGQ 3441. Řídicí systém Heidenhain TNC 640 umožňuje mít tyto kompenzace zapnuté při možné kompenzaci volumetrické přesnosti, a proto byly tyto ponechány aktivované.

C. Kontrola sub soustavy CNC obráběcího stroje (podmínky provozování a jeho stav).

Stroj byl shledán funkční na základě kontroly pohybu jeho os a za pomoci dalších zkoušek. V řídicím systému Heidenhain TNC 640 byla aktivována opce 52 (KinematicsKomp) pro fungování volumetrických kompenzací. Stroj byl temperován cca. 30 minut před samotným měřením a nebyla zjištěna žádná zvýšená teplota stroje. Bylo konstatováno, že stroj je funkční, opce byla úspěšně aktivována, a proto lze přistoupit k přípravě strategie a vlastnímu měření volumetrické přesnosti.

D. Prováděcí plán měřicího procesu sub soustavy pro měření atributů CNC obráběcího stroje (D_1), včetně vlastní realizace měření (D_2).

Strategie měření volumetrické přesnosti se provádí v SW TRAC-CAL 3.0. Zde se nastavuje např.:

- kinematický řetězec stroje;
- rozsah měření;
- koeficient roztažnosti odměřovacích pravítek;
- odhad nejistoty měření;
- offsety nástroje;
- pozice zařízení Laser Traceru atd.

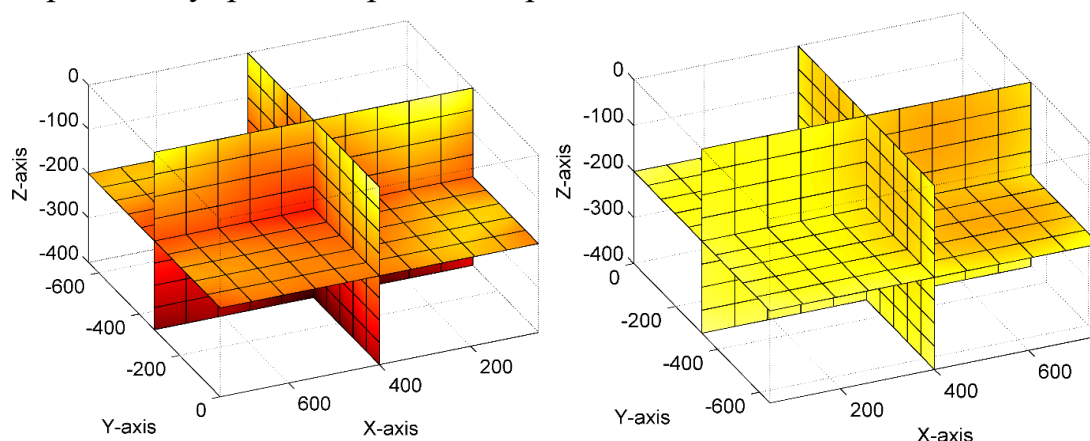
Bylo rozhodnuto, že před měřením volumetrické přesnosti rotačních os bude změřena a kompenzována volumetrická přesnost lineárních os. Po tomto měření bude následovat měření a kompenzace rotační osy C a poté rotační osy A.

Do řídicího systému byly nahrány programy pro měření jak lineárních, tak i rotačních os, které byly vygenerovány v rámci SW TRAC-CAL 3.0. Programy byly odzkoušeny a shledány funkční.

Po vyzkoušení programu se přistoupilo k vlastnímu měření (D_2).

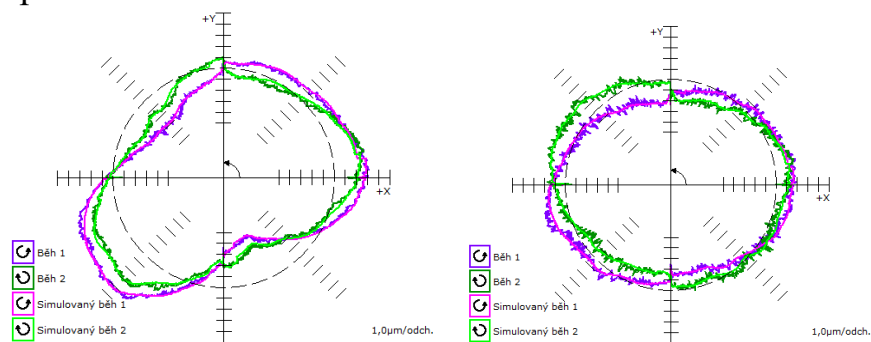
E. Vyhodnocení a analýza naměřených dat.

Měření a kompenzace volumetrické přesnosti lineárních os stroje je vidět na obr. 9. Po kompenzaci byl pracovní prostor zlepšen o cca. 60 %.



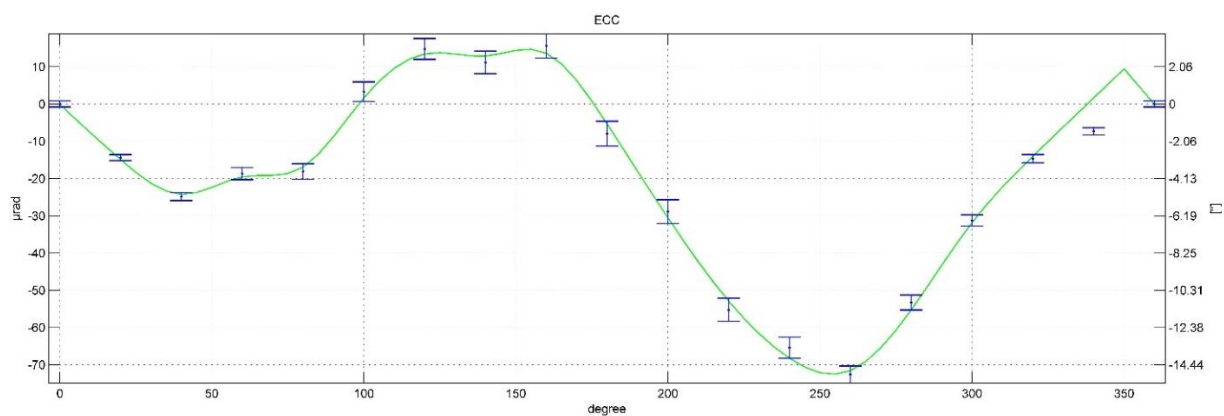
Obr. 9 Výsledky měření volumetrické přesnosti lineárních os před a po kompenzaci

Před verifikačním měřením volumetrické přesnosti byl stroj změřen zařízením DBB k ověření úspěšné aktivace volumetrické kompenzace. Z obr. 10 je vidět zlepšení přesnosti kruhové interpolace na tvaru kruhovitosti (především kolmost), a proto byl stroj verifikován zařízením Laser Tracer k zjištění zlepšení celkové volumetrické přesnosti.



Obr. 10 Přesnost kruhové interpolace v rovině XY před a po volumetrické kompenzaci

Po kompenzaci volumetrické přesnosti lineárních os se nejdříve musí měřit ta rotační osa, která je první v kinematickém řetězci od obrobku k nástroji, tedy osa C. Ukázka měření chyby ECC je znázorněna na obr. 11.

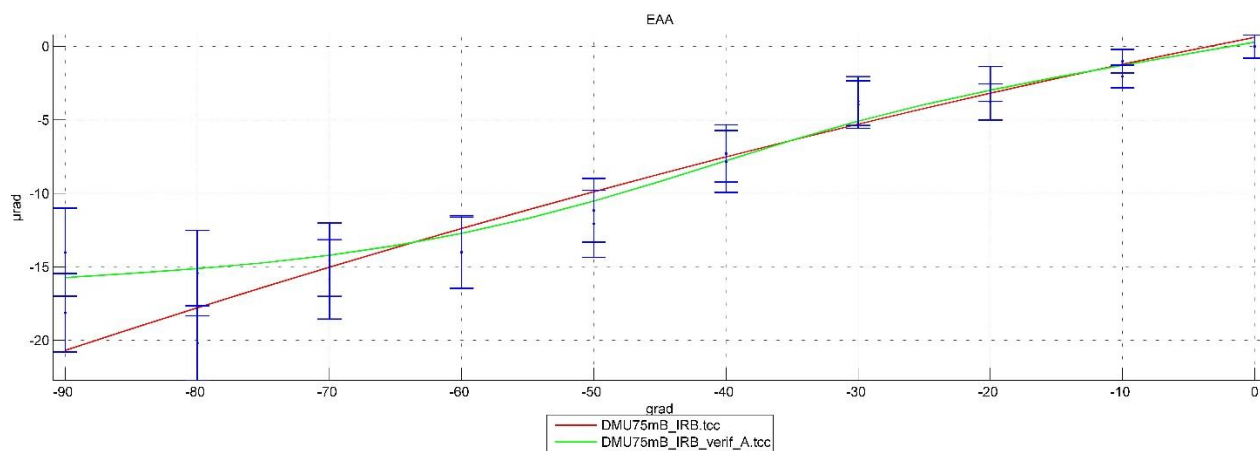


Obr. 11 Chyba ECC osy C



Obr. 12 Ukázka měření osy C zařízením Laser Tracer na stroji DMU

Po změření osy C se měřila a kompenzovala osa A, kde červená barva znamená chybu při kalibračním měření a zelená při verifikačním. Ukázka měření chyby EAA je znázorněna na obr. 13.



Obr. 13 Chyba EAA osy A



Obr. 14 Ukázka měření osy A zařízením Laser Tracer na stroji DMU

Po kompenzaci volumetrické chyby lineárních os nastalo zlepšení přesnosti o cca 60 %. U rotační osy C měření proběhlo v pořádku, nicméně po nahrání kompenzace bylo zjištěno, že tato nefunguje. Důvod byl takový, že řídicí systém HH 640 uměl kompenzovat pouze jednu otáčku osy. Po zjištění stavu byla kontaktována firma Heidenhain a předvedeny výsledky měření. Firma slíbila nápravu formou aktualizace systému, nicméně v době vydání již nebyl na ÚVSSR dostupný stroj DMU. Z toho důvodu se zatím nepodařilo ověřit funkčnost kompenzace rotační osy C. Osa A byla změřena a kompenzována bez větších problémů.

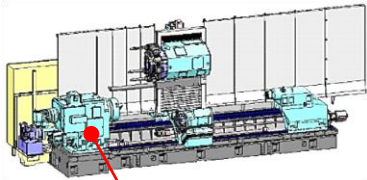
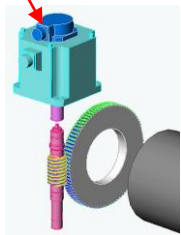
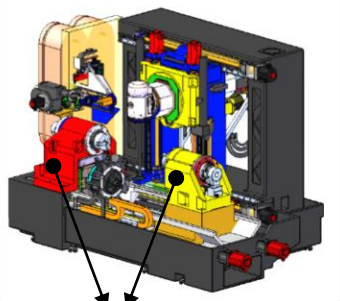
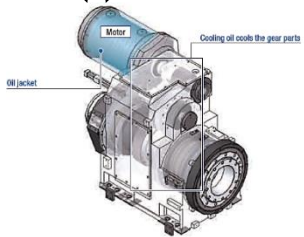
F. Predikce vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic CNC obráběcího stroje

Na základě měření případové studie jsou v následující kapitole (5.2) ukázky dvou tabulek predikcí volumetrické přesnosti pro různé kinematiky strojů.

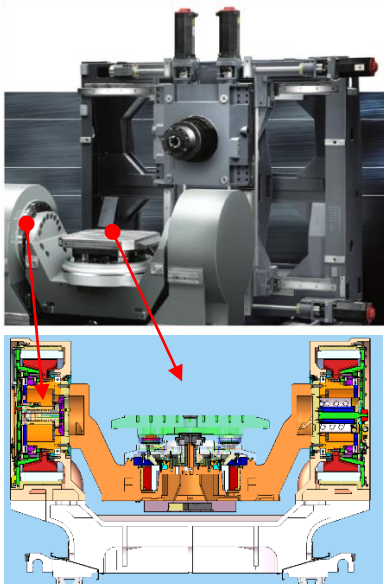
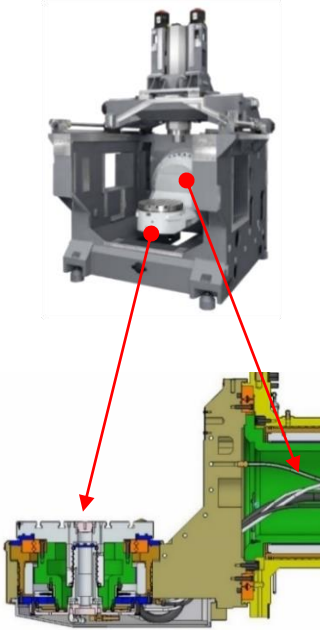
5.2 PREDIKCE VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ ROTAČNÍCH KINEMATICKÝCH DVOJIC CNC OBRÁBĚCÍCH STROJŮ PRO OBROBEK

Na základě předchozí případové studie (kap. 5.1) a jejich výsledků budou v níže ilustrovaných tabulkách uvedeny predikce vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic CNC obráběcích strojů pro obrobek. V tabulkách se pod pojmem predikované zlepšení přesnosti rozumí odhad zvýšení přesnosti CNC obráběcího stroje volumetrickou kompenzací, a tak hovoříme o volumetrické přesnosti.

Tab. 1: Predikce volumetrické přesnosti u čtyřosých CNC obráběcích strojů s rotačními osami pro obrobek

Čtyřosé CNC obráběcí stroje			
<i>provedení rotační kinematické dvojice</i>	<i>vybrané technické údaje typ stroje výrobce</i>	<i>konstrukční provedení</i>	<i>predikované zlepšení přesnosti</i>
<i>Elektromechanické</i>	• průměr obrobku: 800 mm • délka obrobku: 3000 mm • hmotnost obrobku: 6000 kg • přesnost osy C: 20" vodorovné soustružnické obráběcí centrum CT 5500 MT Yamazaki Mazak	  lineární osy: valivé profilové vedení	+ 50 %
<i>Elektromechanické</i>	• průměr obrobku: 1070 mm • délka obrobku: 6600 mm • hmotnost obrobku: 6000 kg • minimální indexovaná jednotka dělení: 0,001⁰ vodorovné soustružnické multifunkční obráběcí centrum NT 6000/6600 DCG DMG MORI	  lineární osy: valivé profilové vedení	+ 50 %

Tab. 2: Predikce volumetrické přesnosti u pětiosých CNC obráběcích strojů s rotačními osami pro obrobek

Pětiosé CNC obráběcí stroje			
<i>provedení rotační kinematické dvojice</i>	<i>vybrané technické údaje typ stroje výrobce</i>	<i>konstrukční provedení</i>	<i>predikované zlepšení přesnosti</i>
<i>Elektrické</i>	• průměr obrobku: 1000 mm • výška obrobku: 850 mm • hmotnost obrobku: 800 kg • minimální indexovaná jednotka dělení: 0,001⁰ vodorovné frézovací obráběcí centrum NMH 6300 DCG DMG MORI	 lineární osy: valivé profilové vedení, Box in Box konstrukce	+ 60 %
<i>Elektrické</i>	• průměr obrobku: 1070 mm • délka obrobku: 6600 mm • hmotnost obrobku: 6000 kg • minimální indexovaná jednotka dělení: 0,001⁰ svislé frézovací obráběcí centrum DMG MORI	 lineární osy: valivé profilové vedení	+ 60 %

V uvedených predikcích jsme vycházeli z následující úvahy:

- za referenční hodnotu jsme brali výsledek z námi prakticky změřené případové studie a praktických zkušeností z měřených dalších strojů;
- i když došlo ke změření pouze jednoho kusu takového stroje, můžeme na základě doktorandovy praxe ve firmě Fermat na strojích tříosých prohlásit, že opakovatelnost hodnot je vyhovující a docílujeme průměrného zlepšení přesnosti díky volumetrické kompenzaci o 50%;
- je velmi důležitá stálá teplota okolního prostředí a stroje samotného během měření, kompenzace a predikce;
- lepší předpoklad pro zvýšení přesnosti má elektrické provedení rotační kinematické dvojice, protože mechanický vložený prvek (převod) se časem opotřebuje a dochází ke snížení vymezení vůle, a proto jsou volena větší hodnoty zvýšení přesnosti
- výjimku tvoří stroje z produkce Mitsui Seiki, které jsou tak mechanicky přesné z výrobního japonského závodu, že zde zvýšení přesnosti pomocí volumetrické kompenzace nebude tak vysoké.

6 PŘÍNOS DIZERTAČNÍ PRÁCE

Dizertační práce o názvu predikování vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic obráběcích strojů si kladla za cíl návrh metodiky pro predikci vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic obráběcích strojů.

Přínos dizertační práce lze spatřovat ve dvou rovinách:

- teoretické, kdy došlo k aplikaci teorie systémového přístupu při tvorbě této metodiky;
- praktické, kdy na základě případové studie na určitém CNC obráběcí stroji, došlo k predikci vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic pro obrobek.

Praktická aplikace potom spočívá v tom, že z případové studie je schopen výrobce CNC obráběcích strojů využívajících rotační kinematické dvojice pro obrobek predikovat jejich chování při nasazení u zákazníka. Tato předpověď (predikce) je možná již ve fázi tvorby výkresové dokumentace. Z tohoto lze usuzovat na to, že díky tomuto dojde k ušetření případných dalších servisních zásahů. Dále z tohoto plyne, že je možné jako opci prodávat tzv. volumetrickou kompenzaci, protože jak bylo prokázáno, dojde k jejímu zvýšení řádově v desítkách procent.

Tím se stávají tyto predikované hodnoty aplikovatelné nejenom ve vlastní konstrukční a projekční činnosti, ale také pro obchodně technickou nabídku pro zákazníka a také pro vlastní servisní činnost na provozovaném stroji.

V oblasti pedagogicko – vědecké bude pomocí získaných poznatků zkvalitněna výuka nejenom v předmětu G1S (Stavba výrobních strojů I) a GTS (Testování obráběcích strojů), ale také při vlastním měření na strojích v dílně Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky.

7 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÉHO CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Cíle dizertační práce vyplynuly z dlouhodobých diskuzí mezi pracovníky Ústavu výrobních strojů systémů a robotiky a dále také z praktického působení doktoranda v průmyslové praxi, kdy jako technik kvality firmy Fermat provádí praktickou aplikaci volumetrických kompenzací u zákazníků této firmy. Z tohoto pohledu se stanovení cílů dizertační práce jeví jako aktuální a potřebné nejenom pro praxi, ale také pro teoretický rozvoj výuky na FSI, VUT v Brně.

Dizertační práce o názvu predikování vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic obráběcích strojů si kladla za cíl návrh metodiky pro predikci vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic obráběcích strojů. Pro predikci vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic obráběcích strojů. Metodika brala v úvahu dostupnost vhodné měřicí techniky, popis konstrukčního provedení rotačních kinematických dvojic.

Navržená metodika a její postupy budou v praxi využitelné pro:

- predikci chování rotačních kinematických dvojic a to také již ve fázi konstrukce CNC obráběcího stroje tím, že konstruktér bude tyto aplikovat do konstrukce stroje;
- plánování strategie měření pro konkrétní kinematiku rotační dvojice;
- posouzení správnosti výsledků;
- aplikování kompenzace pro konkrétní kinematiku.

Z předložené případové studie vyplynuly předpoklady, za kterých lze provést zpětné zásahy do provedení stroje a to již v předvýrobní etapě konstruování. Z tohoto pohledu se domnívám, že cíle dizertační práce byly splněny.

8 ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ

8.1 DOPORUČENÍ PRO VĚDECKÝ ROZVOJ A VÝUKU

V předložené dizertační práci byl představen návrh nové metodiky pro predikci vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic obráběcích strojů. Jak se ukázalo, tak byla velmi potřebná pro její sestavení teorie systémového přístupu. Tento univerzální prostředek při správné aplikaci je mohutným nástrojem pro technické obory, které se zabývají konstruováním, zejména pak konstruováním výrobních strojů nebo robotů.

Na základě této zkušenosti doporučuji aplikovat do podvědomí studentů tento vědecký nástroj pro zpracovávání semestrálních a zejména pak do diplomových a dizertačních prací.

Pro další vědecký rozvoj na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky, FSI, VUT v Brně doporučuji navázat na téma mé dizertační práce a rozvádět je v dalších navazujících pracích pro:

- predikci chování CNC obráběcích center s rotačními dvojicemi pro polohování nástroje;
- predikci chování CNC obráběcích center s lineárními dvojicemi pro polohování nástroje i obrobku.

8.2 DOPORUČENÍ PRO PRAXI

Predikce vlastností prakticky znamená, že pokud bude mít rotační osa pro obrobek určité konstrukční provedení shodné s konstrukčním provedením, na kterém bylo prováděno měření, tak lze předpokládat, že se navrhovaný stroj bude chovat podobně. Výrobce CNC obráběcích strojů tak může předpokládat, že pokud budou dodrženy zásady posloupnosti a návaznosti jednotlivých typů přesností, tak bude mít CNC obráběcí stroj přibližně dosažitelné vlastnosti, jako bylo demonstrováno na případových studiích.

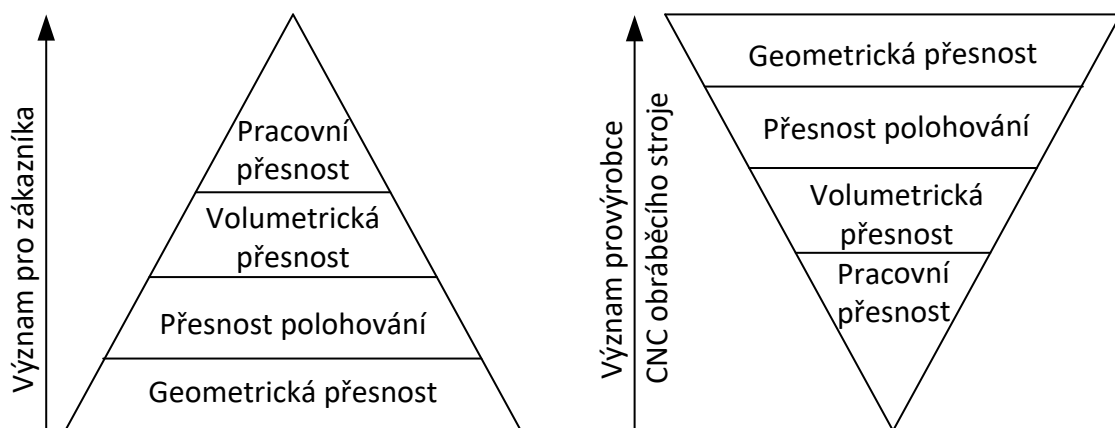
Není v našich silách, ani technických a finančních možnostech provádět několik opakovaných měření na CNC obráběcích strojích jiného výrobního čísla, ale stejného typu. Bude zde jistá nejistota odhadu, kterou můžeme odhadnout z podobného problému, který byl publikován v [7].

Pokud budeme usuzovat, že existuje závislost mezi rokem výroby, pak pro stejnou velikost je patrná nejistota našeho závěru: 10%. Toto velmi zjednodušené přirovnání je nutné, aby prozkoumali příslušní pracovníci závodů, kteří chtějí aplikovat naše závěry predikcí do svých strojů. Můžeme se domnívat, proč dochází, k nejistotě výroby. Podle nás to souvisí s otázkami typu:

- Byl to stále stejný pracovník, který obráběl desku stolu?
- Obráběl ji a posléze montoval stále stejným postupem?
- Byly v době měření stále stejné podmínky okolí, postup, měřidlo?
- Neprovedl někdo změnu, o které si myslí, že je v pořádku a ona zatím vede k rozptylu naměřených hodnot?

Taktéž je velmi důležité naše další doporučení týkající se chápání jednoho z prvků přesnosti, a sice volumetrické přesnosti. Tento způsob kompenzací, dávající předpoklady ke zvýšení pracovní přesnosti musí být zcela jasně postaven na pevných základech. Těmi pevnými základy jsou precizně a podle výrobní dokumentace obrobené a smontované díly, jinými slovy shodné díly. Tím se stává geometrická přesnost základní a fundamentálním předpokladem pro vysokou výrobní přesnost, k níž přispívá přesnost polohování a posléze volumetrická kompenzace. To by měl cítit výrobce CNC obráběcích strojů.

Naopak uživatel toto až na výjimky zase nezajímá a požaduje obrobení svých obrobků, kvůli kterým si pořizuje určitý CNC obráběcí stroj. Pak je aplikační pyramida přesností jiná (obr. 15).



Obr. 15 Chápání různých typů přesnosti u uživatel a výrobce CNC obráběcího stroje.

Jednoznačně k tomu, aby bylo možné provádět věrohodnou predikci chování rotačních kinematických dvojic pro obrobek u CNC obráběcích strojů, doporučujeme jejich precizní provedení geometrické přesnosti a ke zmenšení nejistoty provést měření u stejného typu alespoň pětkrát.

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. B.m.: MM publishing, s.r.o., 2014. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [2] MAREK, Tomáš a Jiří MAREK. *Mít sondu nestačí*. Brno: Renishaw s.r.o., 2017. ISBN 978-80-87017-20-3.
- [3] RAMESH, R, M A MANNAN a A N POO. Error Compensation in Machine Tools - a review Part I: Geometric, Cutting Force induced and fixture depend errors. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2000, 40, 1235–1256. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:doi:10.1016/S0890-6955(00)00009-2
- [4] DEMEČ, Peter. *Presnosť obrábacích strojiv a jej matematické modelovanie*. B.m.: Elfa s.r.o, 2001. ISBN 80-7099-620-X.
- [5] MAREK, Jiří. *Stavba CNC obráběcích strojů - souvislosti a fakta*. B.m.: Grumant s.r.o., 2017.
- [6] HOLUB, Michal a kol. *Metodický postup zavádění volumetrických kompenzací 5ti osých obráběcích center s kinematikou „BK“*. 2018.
- [7] HOLUB, Michal. *VLIV GEOMETRICKÉ PŘESNOSTI VYBRANÝCH OBRÁBĚCÍCH CENTER NA POŽADOVANÉ VLASTNOSTI VÝROBKU*. B.m., 2011. Vysoké učení technické v Brně.

10 ŽIVOTOPIS

Osobní údaje

Ing. Tomáš Marek, narozen 26.6.1989 v Brně

Pracoviště

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, Odbor výrobních strojů

Fakulta strojního inženýrství

Vysoké učení technické v Brně

Technická 2896/2

616 69 Brno

Vzdělání a akademická kvalifikace

2008-2012: Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Zemědělská 1665/1, 613 00 Brno

Obor: Provoz techniky (zakončen SZZ a titulem Bc.)

2012-2014: Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Zemědělská 1665/1, 613 00 Brno,

Obor: Management techniky (zakončen SZZ a titulem Ing.)

2014-dosud: Vysoké učení technické v Brně, FSI, Technická 2, 616 69, Brno

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství (doktorské studium, SDZ složena 2017)

Pedagogická činnost

GTS Testování obráběcích strojů

HVS Výrobní stroje

FVY Výrobní stroje a zařízení

Přehled zaměstnání

2014-dosud ÚVSSR – odbor výrobních strojů – asistent

2017-dosud Fermat CZ, Kontrolor kvality obráběcích strojů

Vědecko-výzkumná činnost, zapojení do projektů

2019-dosud Strojírenská výrobní technika a přesné strojírenství, DMS OP VVV CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008404, člen řešitelského týmu

2017-dosud Zvyšování technické vyspělosti výrobních strojů a zařízení, id projektu FSI-S-17-4477, člen řešitelského týmu

2014-2017 TA04011406, Využití progresivních technologií pro efektivní stavbu obráběcích strojů

2017 Zpracování studijní opory do předmětu „Výrobní stroje a zařízení – FVY, id projektu FV 17-29

2015 Inovace předmětu "Test Code for Machine Tools - GTS-A" a "Testování obráběcích strojů - GTS" o zkoušku statické tuhosti obráběcího centra, id projektu FV 15-22

Abstrakt

Dizertační práce slouží jako metodika pro predikci vlastností rotačních kinematických dvojic obráběcích strojů. Motivací pro její sepsání byly neustálé se zvyšující požadavky na vlastnosti (výkonost, přesnost, tuhost statická i dynamická) obráběcích strojů. Metodika bere v úvahu dostupnost vhodné měřicí techniky a popis konstrukčního provedení rotačních kinematických dvojic. Bude využitelná pro predikci chování rotačních kinematických dvojic a to také již ve fázi konstrukce CNC obráběcího stroje tím, že konstruktér bude tyto aplikovat do konstrukce stroje. Práce je zpracována tak, že je nejdříve pomocí systémového přístupu sestavena metodika pro predikci chování rotační kinematické dvojice u CNC obráběcích strojů, plánování strategie měření a ověření správnosti výsledků včetně aplikací pro konkrétní provedení kinematického řetězce vybraného stroje. Na základě tohoto systémového přístupu a z něj vyplývající metodiky bylo provedeno měření rotační kinematické dvojice obráběcího stroje. Výsledky systémového přístupu a měření jsou zobecněny do podoby doporučení pro konstruktéry obráběcích center, umožňující zvýšení přesnosti rotační kinematické dvojice.

Abstract

The dissertation thesis is used as a methodology for prediction of selected parameters of rotational kinematic pairs of machine tools. The motivation for its writing has been continually increasing requirements for parameters (performance, accuracy, static and dynamic stiffness) of machine tools. The methodology takes into account the availability of suitable measuring devices and description of the design of rotary kinematic pairs. It will be useable for predicting the behavior of rotational kinematic pairs, even at the design stage by applying results to the machine design. The work is processed so that first is used a system approach to suggest methodology for prediction of the behavior of rotary kinematic pair in CNC machine tools, planning measurement strategy and verifying the results, including applications for specific kinematic chain of the selected machine. Based on this system approach and the resulting methodology, the measurement of the rotary kinematic pair was performed. The results of the system approach and measurement are generalized in the form of recommendations for designers of machining centers, allowing to increase the accuracy of the rotational kinematic pair.