



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

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Tomáš Marek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

Brno 2019

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.

KLÍČOVÁ SLOVA

geometrická přesnost, volumetrická přesnost, kinematické rotační dvojice, predikce

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.

KEYWORDS

geometric accuracy, volumetric accuracy, rotational kinematic pairs, prediction

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MAREK, Tomáš. *Predikování vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic obráběcích strojů*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/122509>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem dizertační práci s názvem *Predikce vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic obráběcích strojů* vypracoval samostatně a jen na základě citovaných zdrojů pod vedením školitele doc. Ing. Petra Blechy Ph.D.

V Brně dne

.....
Ing. Tomáš Marek

PODĚKOVÁNÍ

V první řadě bych rád poděkoval svému školiteli doc. Ing. Petru Blechovi Ph.D. za věcné rady a připomínky při zpracování dizertační práce. Poděkování patří i školiteli specialistovi Ing. Michalu Holubovi Ph.D. a všem ostatním pracovníkům ÚVSSR za připomínky jak k dizertační práci, tak i během mého studia. V neposlední řadě patří poděkování rodičům za jejich trpělivost a pomoc během celého mého studia.

Obsah

1	ÚVOD	7
2	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	9
2.1	Definice CNC obráběcího stroje a jejich rozdělení	9
2.2	Užití rotační os u CNC obráběcích strojů	11
2.2.1	Rozbor nasazení rotačních os u CNC obráběcích strojů	11
2.2.2	Konstrukční principy rotačních os	16
2.2.3	Konstrukční provedení rotačních os pro nástroj	17
2.2.4	Konstrukční provedení rotačních os pro obrobek	21
2.3	Měření atributů CNC obráběcích strojů	24
2.3.1	Přesnost měření	24
2.3.2	Přesnost CNC obráběcích strojů	29
2.3.3	Geometrická přesnost CNC obráběcích strojů	32
2.3.3.1	Přesnost polohování CNC obráběcích strojů	32
2.3.3.2	Přesnost kruhové interpolace u CNC obráběcích strojů	33
2.3.3.3	Volumetrické přesnost CNC obráběcích strojů	33
2.3.3.4	Vliv teploty a vibrací	34
2.3.3.5	Pracovní (výrobní) přesnost	36
2.3.4	Geometrické chyby rotačních os	37
2.4	Popis měřících zařízení užívaných u CNC obráběcích strojů	37
2.4.1	Měření přesnosti lineárních os obráběcích center	37
2.4.1.1	Měření přesnosti polohování	38
2.4.1.2	Měření přímosti a úhlových chyb (pitch/yaw)	41
2.4.1.3	Měření kolmosti	43
2.4.1.4	Měření víceosým kalibrátorem	44
2.4.1.5	Měření přesnosti kruhové interpolace	46
2.4.1.6	Měření volumetrické přesnosti	47
2.4.2	Měření přesnosti rotačních os obráběcích center	49
2.4.2.1	Geometrická přesnost	49
2.4.2.2	Měření geometrické přesnosti sondami	49
2.4.2.3	Přesnost polohování	52
2.4.2.4	Volumetrická přesnost	55
2.4.2.5	Měření rotačních os dle normy ČSN ISO 10791-6	56
2.4.2.6	Spindle Error Analyzer – SAE	58
2.5	Řešení problematiky ostatními vědecko-výzkumnými pracovišti	60
3	CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	61
3.1	Motivace	61
3.2	Cíle řešení dizertační práce	61
3.3	Zvolené metody zpracování dizertační práce	61
4	SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP JAKO SOUČÁST SYSTÉMOVÉ METODOLOGIE	63
4.1	Soustava a systém	63
4.2	Systémový přístup	64
4.3	Systémová metodologie	65

5	SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP PRO PREDIKOVÁNÍ VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ ROTAČNÍCH KINEMATICKÝCH DVOJIC CNC OBRÁBĚCÍCH STROJŮ	67
5.1	Popis systémových atributů predikování vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic CNC obráběcích strojů.....	67
5.2	Metodika pro predikování vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic pro obrobek u CNC obráběcích strojů	71
6	PŘÍPADOVÉ STUDIE PREDIKCE VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ ROTAČNÍCH KINEMATICKÝCH DVOJIC	81
6.1	Výběr vlastností rotačních obrobkových kinematických dvojic pro jejich predikci.....	81
6.2	Pětiosé obráběcí centrum DMU 75 monoBlock®	87
6.3	Predikce vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic CNC obráběcích strojů pro obrobek	102
7	PŘÍNOS DIZERTAČNÍ PRÁCE.....	111
8	ZHODNOCENÍ DOSAŽENÉHO CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	113
9	ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ	115
9.1	Doporučení pro vědecký rozvoj a výuku	115
9.2	Doporučení pro praxi	115
10	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	117
11	SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	121
12	VÝKLAD POJMŮ POUŽITÝCH V DIZERTAČNÍ PRÁCI	123
13	SEZNAM OBRÁZKŮ	127
14	SEZNAM TABULEK	131
15	VLASTNÍ PUBLIKACE AUTORA	133
16	TVŮRČÍ AKTIVITY A PROJEKTY AUTORA	135
17	OSTATNÍ ČINNOST AUTORA	137

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 (vyrobiť) 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 změnily 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].

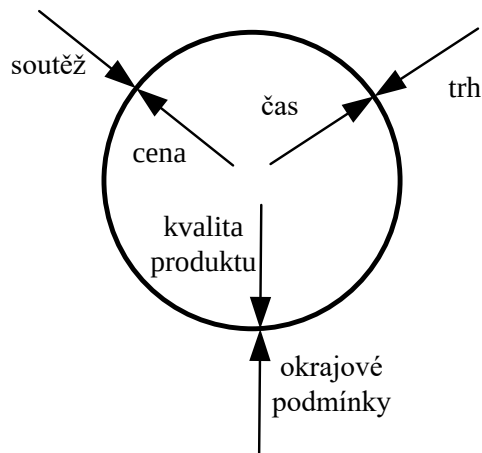
Vnitřní faktory jsou:

- kvalita produktu;
- cena;
- čas;

Vnějšími faktory:

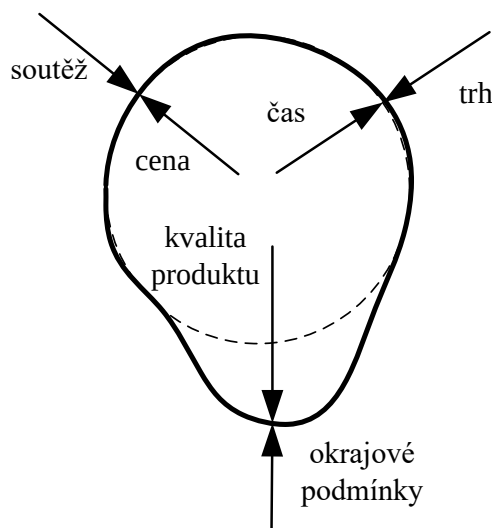
- soutěž;
- trh;
- okrajové podmínky (ekologie, normy, produkt).

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, obr. 2).



Obr. 1 Vnější a vnitřní faktory působící na produkt [1]

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.



Obr. 2 Odchylka reálného stroje od ideálního

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

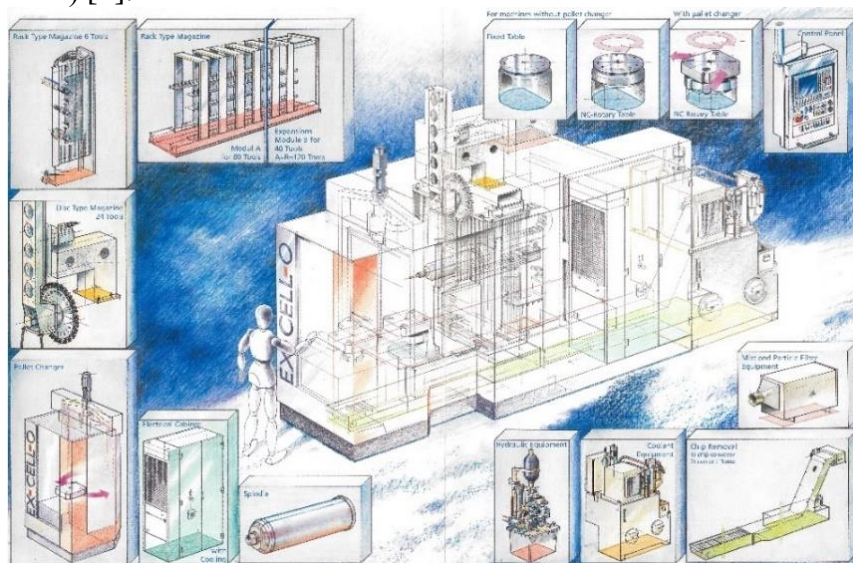
Neustálé se zvyšující požadavky na vlastnosti (výkonost, přesnost, tuhost statická i dynamická) obráběcích strojů vede výrobce k jejich neustálému zlepšování. Chceme-li, aby tyto obráběcí stroje splňovaly požadavky vyšší přesnosti, tuhosti a výkonosti, je potřeba zamezit deformacím a chvěním jednotlivých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

2.1 DEFINICE CNC OBRÁBĚCÍHO STROJE A JEJICH ROZDĚLENÍ

Při číslicovém řízení obráběcích strojů jde konkrétně o řízení procesu obrábění (hlavní a vedlejší řezný pohyb), polohovacích i pomocných funkcí na základě číselných údajů a příkazů. Všechny informace potřebné pro obrobení součásti jsou zaznamenány ve formě řady numerických znaků. CNC obráběcí stroj je tedy obráběcí stroj, který je číslicově řízen a konstrukčně uzpůsoben tak, aby pracoval v automatickém cyklu a měl automatickou výměnu nástrojů, případně obrobků [2].

CNC obráběcí stroj (obráběcí centrum) se skládá ze čtyř hlavních částí (obr. 3). První je mechanická část, která realizuje relativní pohyb mezi řezným nástrojem a obrobkem tak, aby principiálně docházelo k odřezávání třísky. Druhou je elektrická část (CNC řídicí systém a elektroskříň) sloužící k tomu, aby byly na základě instrukcí a povelů vykonávány v mechanické části přesně definované pohyby, zajištěna výměna nástrojů a přívod procesních médií nutných k řezu třísky z polotovaru obrobku. Třetí částí je mezipřelánec, mezi mechanickou částí a CNC řízením, který realizuje to, aby si tyto dvě části rozuměly, a nazývá se PLC. Tyto dvě části CNC stroje jsou operátorovi (obsluze) stroje zpřístupněny na tzv. panelu obsluhy. Poslední a čtvrtou částí jsou všechny procesní média nutná ke správné činnosti stroje (vzduch, hydraulika, chlazení a mazání, elektřina, odvod třísek) [2].



Obr. 3 Hlavní části CNC obráběcího stroje [Ex-cell-o]

Do mechanické části stroje patří následující skupiny [2]:

- nosná soustava – rám stroje;
- pohybové osy stroje, které jsou různé dle typu stroje a jeho provedení;
- vřeteno a vřeteník;
- výměna nástroje a jeho zásobník;
- výměna obrobku a jeho zásobník;
- mechanické kryty (teleskopy) jednotlivých pohybových os a ochranné kryty stroje.

CNC obráběcí stroje můžeme rozdělit podle [2]:

1. uspořádání kinematického řetězce:
 - sériová;
 - paralelní;
 - smíšená.
2. polohy osy vřetena:
 - svislá;
 - vodorovná;
 - universální.
3. počtu řízených os:
 - tříosá
 - víceosá (4, 5).
4. počtu vřeten:
 - jednovřetenová;
 - vícevřetenová.
5. tvaru obráběného obrobku:
 - rotační obrobku;
 - nerotační obrobky;
 - multifunkční (semi multifunkční).
6. možností provést více druhů technologických operací:
 - obráběcí centra;
 - semi multifunkční obráběcí centra;
 - multifunkční obráběcí centra.
7. aplikace:
 - speciální použití (HSC,HFM, HPC obrábění, mikro obrábění,);
 - nízkonákladové provedení;
 - v kusové, malo sériové, velkosériové a hromadné výrobě;
 - v různém průmyslu (energetický, těžký, letecký, dopravní).

Jak je patrné, jednotlivé body dělení se mohou prolínat: např. tříosé svislé obráběcí centrum na nerotační obrobky pro energetický průmysl apod. Existuje velké množství kombinací naznačeného rozdělení a ty nejsou předmětem této práce.

Pokud má stroj možnost provádět různé druhy technologických operací a provádět navíc automatickou výměnu nástrojů a obrobků, pak hovoříme o obráběcím centru. Obráběcím centrem rozumíme takový číslicově řízený stroj, který [2]:

- pracuje v automatickém cyklu;
- může provádět různé druhy třískových operací;
- je vybaven automatickou výměnou nástrojů;
- je vybaven automatickou výměnou obrobků;
- může pracovat v bezobslužném provozu;
- je vybaven prvky diagnostiky a měření;
- je vybaven prvky inteligence.

Pro obráběcí centra je charakteristické, že jedna ze dvou základních operací třískového obrábění je dominantní. Tedy např. soustružení je dominantní a frézování doplňkové anebo naopak. Pak jsou tyto obráběcí centra používané převážně pro obrábění nerotačních obrobků (někdy méně správně nazývané frézovací obráběcí centra), anebo převážně pro obrábění rotačních obrábění rotačních obrobků (někdy méně správně nazývané soustružnická obráběcí centra). Jak dále patrné, mohou být dle situování nástroje v prostoru vůči obrobku svislá anebo vodorovná. Multifunkční obráběcí centra jsou konstrukčně odvozena z CNC soustružnických anebo frézovacích obráběcích center. Multifunkčním obráběcím centrem rozumíme CNC obráběcí stroj, který má [2]:

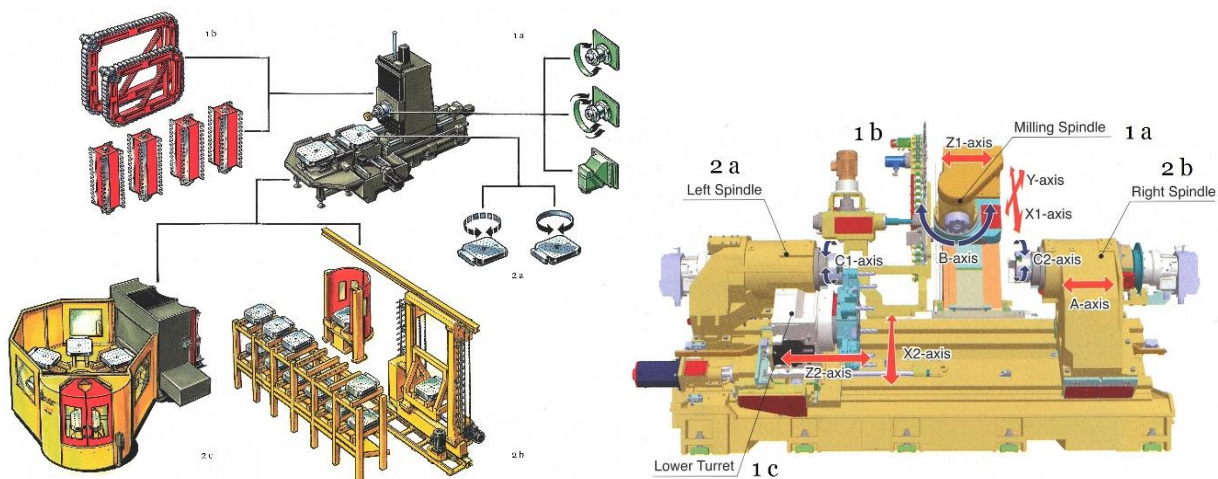
- vlastnosti obráběcího centra;
- navíc přidanou hodnotou spočívající v tom, že různé druhy třískového obrábění mají oproti obráběcímu centru pro různé operace třískového obrábění přiblížené velikosti instalovaných výkonů (zejména pak kroutícího momentu);
- velkou kinematickou adaptabilitu v obrobku a nástroji;
- výrobcem umožněno v co největší možné míře obrábět různé tvary obrobků na jedno upnutí a na jednom stroji (např. soustružení a frézování skříní, smykadel apod.).

U některých výrobců je možné pozorovat konstrukce, které jsou napůl mezi obráběcími centry a multifunkčními obráběcími centry. Do jejich pohybových os je vložen soustružnický stůl (frézovací stroje), anebo frézovací vřeteno (soustružnické stroje), ale technicky využitelné instalované parametry (výkon, moment) jsou výrazněji rozdílné. Takovéto stroje nazveme semimultifunkční obráběcí centra [2].

2.2 UŽITÍ ROTAČNÍ OS U CNC OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

2.2.1 Rozbor nasazení rotačních os u CNC obráběcích strojů

Předmětem našeho dalšího zájmu nebudou dle výše uvedeného dělení semimultifunkční obráběcí centra, ale jenom CNC obráběcí a multifunkční centra. Pokud chceme provést úvahu nad tím, jakým způsobem jsou rotační osy nasazeny v konstrukci těchto strojů, tak je výhodné jejich morfologii rozdělit a uzly spojené s obrobkem a uzly spojené s nástrojem. Na obr. 4 jsou znázorněny typické konstrukce CNC obráběcích strojů pro rotační a nerotační obrobky. Vidíme, že jsou zde použity rotační osy většinou ve formě hlav (uzel pro nástroj) a stolů (uzly pro obrobek).

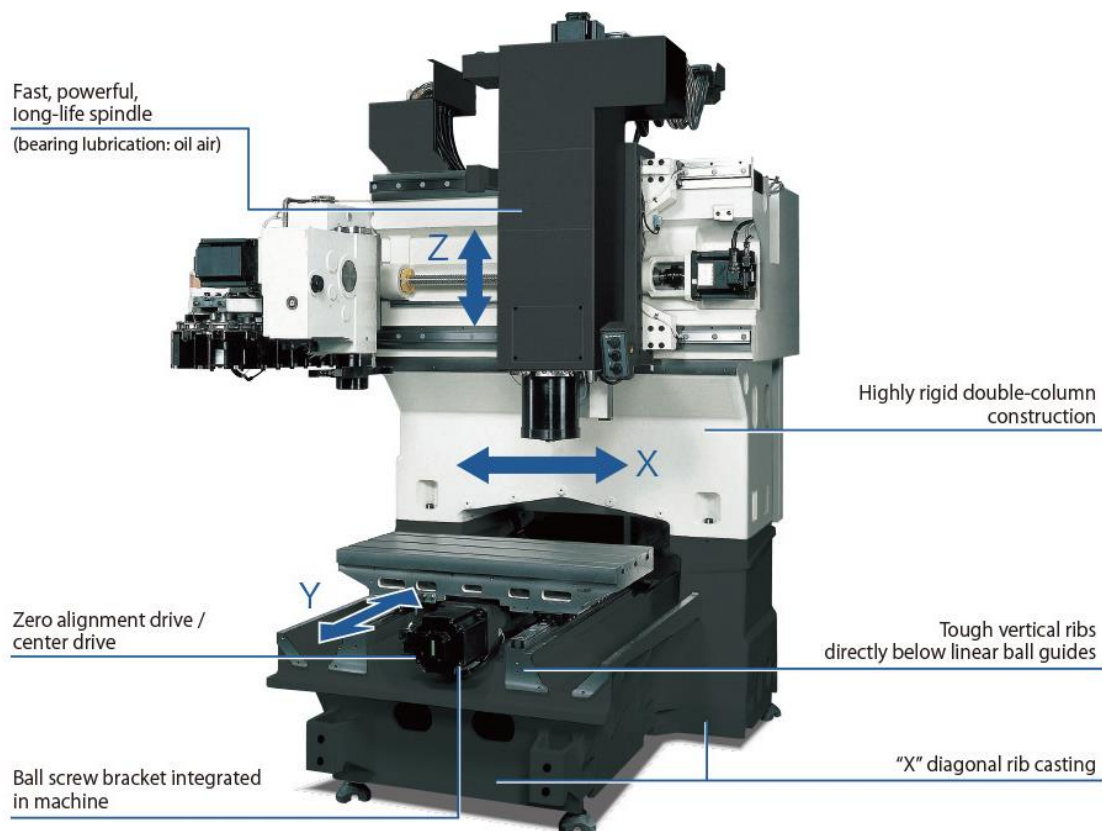


1 a – vřeteno (kyvná hlava), 1 b – zásobník nástrojů, 1 c – revolverová hlava

2 a – otočný stůl (vřeteník), 2 b, 2 c - výměník a zásobník palet,

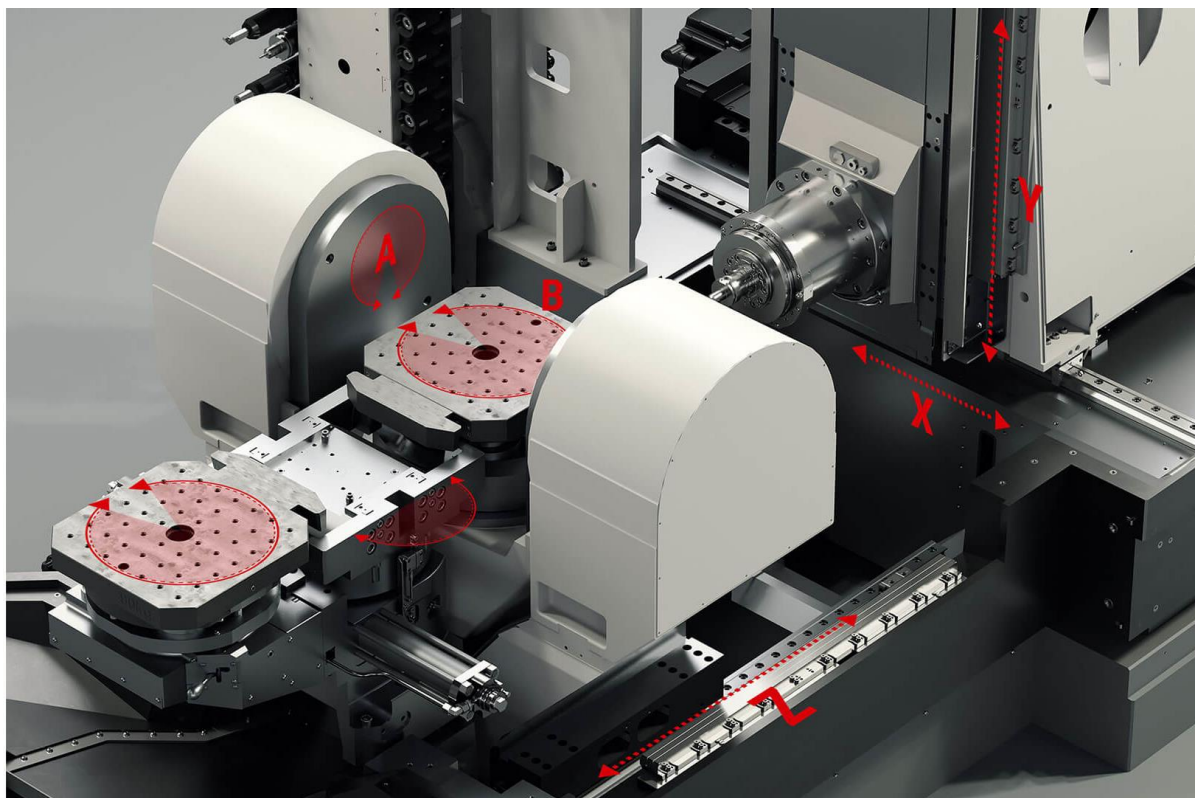
Obr. 4 CNC obráběcí stroj pro rotační a nerotační obrobek [Starragheckert][Daewoo]

Při užití 3 – osého obráběcího stroje se nástroj v pracovním prostoru přesouvá pouze za pomoci tří lineárních os X, Y a Z. To znamená, že se při tříosém obrábění programují pouze tyto lineární osy (obr. 5). Díky tomuto kinematickému uspořádání je obrobek obráběn „vrstvu po vrstvě“. Nevýhodou je, že nelze nastavit orientaci nástroje (nebo obrobku) v pracovním prostoru, a proto je nutné použít rotační kinematické dvojice.



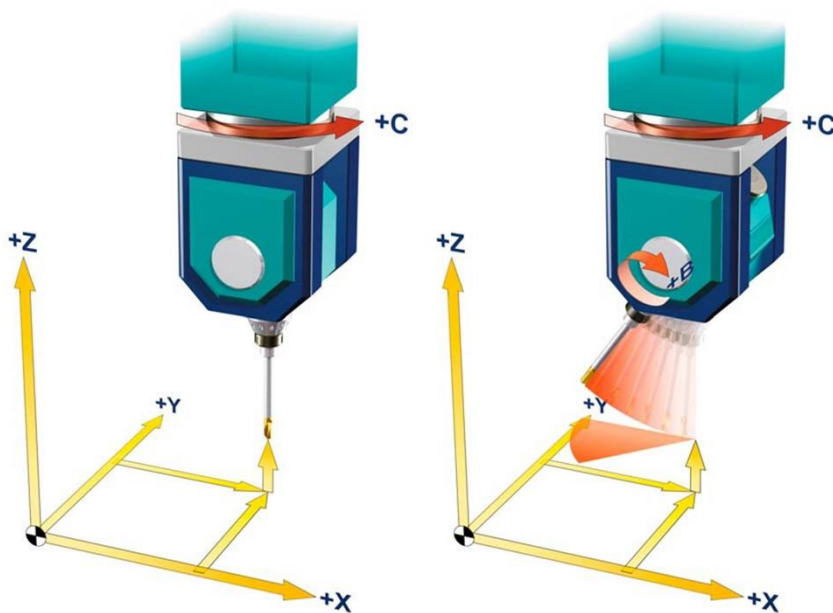
Obr. 5 3D obrábění [Okuma]

Při použití tří lineárních os a dvou rotačních os se hovoří o pěti osém obrábění (obr. 6). Tyto rotační (i lineární) osy jsou definované dle normy ČSN ISO 841. Rotační osa se značí A, pokud se otáčí kolem lineární osy X. Analogicky se značí B (rotace kolem Y) a C (rotace kolem Z). Víceosé obrábění je v posledních letech na vzestupu a je proto třeba položit otázku, v čem je tato metoda obrábění výhodnější. První výhoda je napsána výše a to, že je možnost nejen polohování nástroje (obrobku) pomocí lineárních os, ale i nastavení orientace pomocí rotačních kinematických dvojic. Díky této orientaci lze obrábět i tvarově složitější obrobky. Tam, kde je u tří osého obrábění potřeba odepnout, natočit a znovu upnout obrobek, u víceosého stačí vhodně natočit rotační kinematickou dvojici. Tím lze zkrátit neproduktivní časy a zvýšit efektivitu výroby.



Obr. 6 5D obrábění [Starrag]

Na obr. 7 je vidět rozdíl mezi pohybem nástroje při tří osém i pěti osém obrábění. Přestože je u tří - osého obrábění naznačena rotační osa C, tak díky kinematickému uspořádání se natáčí pouze kolem osy Z a to jí nedovoluje orientovat nástroj do prostoru. Přidáním druhé rotační osy (B) se rozšiřují možnosti obrábění díky možnosti orientovat nástroj do libovolné pozice v pracovním prostoru stroje.



Obr. 7 Pohyb nástroje při 3D a 5D obrábění [Siemens]

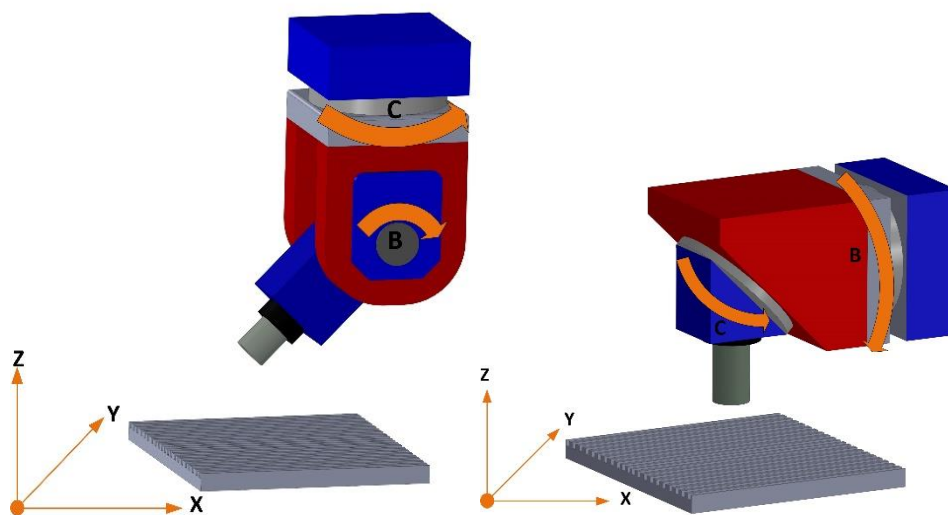
Výhody pěti osého obrábění dle firmy MAZAK jsou [4]:

- obrábění tvarově složitějších tvarů obrobků;
- ušetření času a peněz vynaložených na přípravu a znovuuštění dílců;
- vyšší přesnost obrobků;
- možnost použití kratších nástrojů pro vyšší řezné rychlosti;
- menší vibrace nástrojů;
- dosažení lepší povrchové kvality dílců.

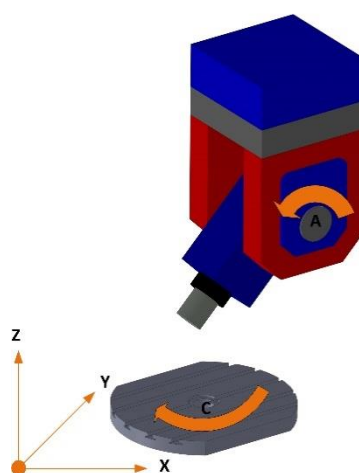
Pěti – osé obrábění lze rozdělit na dva typy. První je tzv. obrábění 3+2. Při tomto se pohybují lineární osy a rotační (4. a 5. osa) jsou zastaveny v určité poloze. Po dokončení technologické operace je potřeba rotační osy otočit do další pozice a teprve poté se pokračuje s obráběním. Výhodněji se jeví tzv. kontinuální pěti – osé obrábění. Při této metodě se všech pět os, vyžaduje – li to technologická operace, pohybuje spolu, tzn. ve stejném čase. Toto obrábění je však náročné nejenom na konstrukci vlastního uzlu realizujícího pohyb, ale i na CNC řízení.

Rotační kinematické dvojice se vyskytují zejména na strojích pro víceosé obrábění, dále pak na obráběcích a multifunkčních obráběcích centrech a to ve formě příslušenství (obráběcí hlavy, otočné stoly, rotačně naklápěcí stoly). U těchto strojů se pro nastavení relativní polohy nástroje vůči obrobku používají zejména následující konstrukční řešení kinematických dvojic:

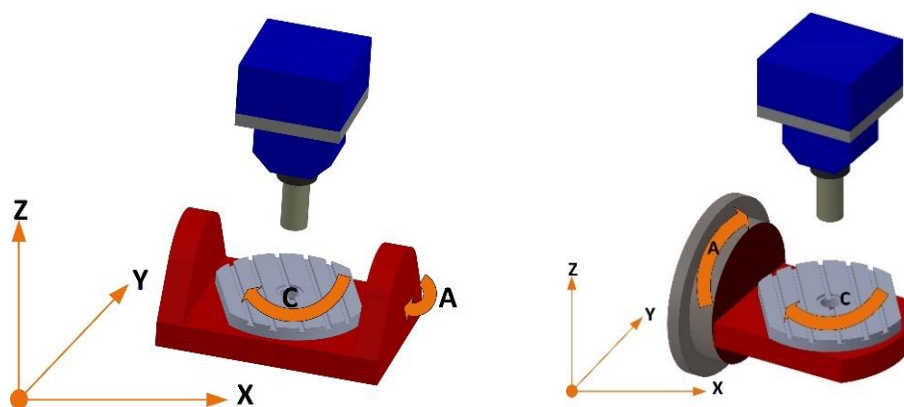
- a) dvě rotační osy v polohování nástroje (obr. 8)
- b) jedna rotační osa v polohování nástroje a jedna v polohování obrobku (obr. 9)
- c) dvě rotační osy v polohování obrobku (obr. 10)



Obr. 8 Vidlicová a univerzální (diagonální) hlava



Obr. 9 Vidlicová hlava a rotační stůl

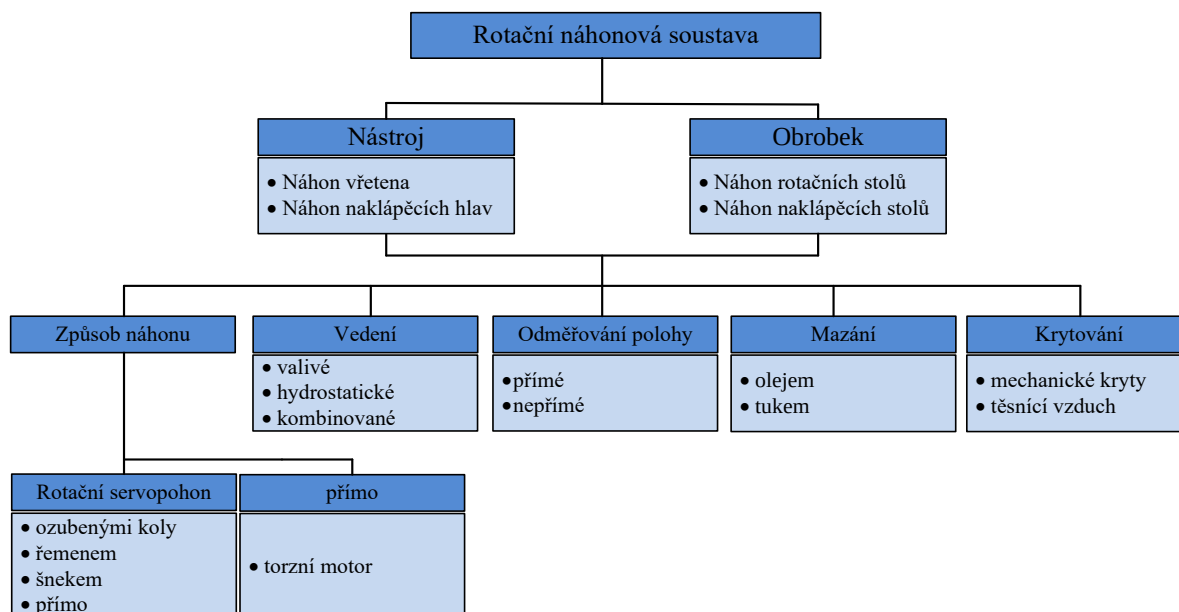


Obr. 10 Rotační a naklápěcí stůl a pevné vřeteno

Shora uvedený kinematický rozbor není úplný. Podrobně je uveden v [2]. Obr. 8, 9 a 10 prezentují nejčastěji se vyskytující užití rotačních os v konstrukci CNC obráběcích strojů.

2.2.2 Konstrukční principy rotačních os

Ve stavbě CNC obráběcích strojů existují dva typy rotačních náhonových soustav podle toho, kterou kinematickou skupinu nahánějí. A sice dle toho zda nahánějí nástroj anebo obrobek. Morfologie rotačních náhonových soustav dle literatury [1] je na obr. 11.



Obr. 11 Morfologie rotační náhonové soustavy [1]

Vhodný způsob náhonu rotační osy je dán kinematickými, dynamickými nebo statickými poměry, které je nutné posuzovat případ od případu. Nejvíce využívaným rotačním servomotorem jsou asynchronní elektronicky komutované elektromotory (AC). Ty jsou ve formě přírubových, anebo vestavěných motorů. Pro náhon rotačních os CNC obráběcích center jsou ustálena následující konstrukční řešení [1]:

- servopohonem přes vložené převody (řemen, ozubená kola, šnekem);
- přímým pohonem, bez mechanických prvků pomocí torzních motorů (elektrovřeten);
- přímo, kdy je servomotor napojen přes spojku na konec vřetena;
- přes vloženou mechanickou řaditelnou převodovku.

Nejčastější uložení rotačních (kyvných) částí je pro:

- nástrojové uzly (hlavy) ve valivých ložiskách, méně často v hydro statických ložiskách;
- obrobkové uzly (stoly) ve valivých, nebo hydrostatických ložiskách, případně v jejich kombinacích.

Díky charakteru nasazení rotačních os je nutností, aby jejich poloha byla vždy odměřována nejlépe přímým odměřováním. Méně častější je využití nepřímého odměřování. Způsob mazání se odvíjí od způsobu uložení. Pokud je rotační osa uložena hydrostaticky, je mazána olejem. Extrémně zatížené osy uložené valivě jsou také mazány olejem. Z důvodů konstrukčních (jednoduchost), uživatelských i pro údržbu je nejlepší mazání tukem používané pro valivá ložiska.

2.2.3 Konstrukční provedení rotačních os pro nástroj

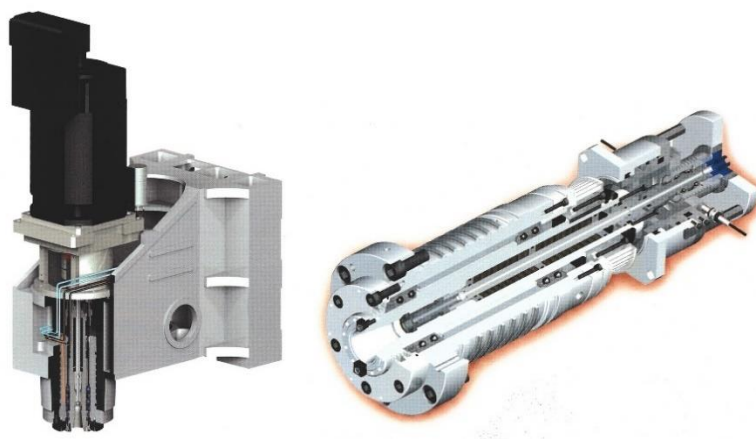
U CNC obráběcího stroje schopného obrábět ve 3D režimu, je rotační osou pouze náhon vřetena. Pak je pro jeho náhon použit (obr. 12):

- řemenový náhon;
- vložená převodovka;
- vestavěný motor.

Jak je z obrázku patrné, je vřeteno uloženo valivě.



řemenový náhon svislé a vodorovné osy vřetena



přímý náhon svislé a vodorovné osy vřetena napojením vřetena na motor



přímý náhon svislé a vodorovné osy vřetena elektrovřetenem

Obr. 12 Způsoby náhonu vřetena frézovacího CNC obráběcího centra pracujícího 3D technologií obrábění [Quaser]

Je-li pro některý CNC obráběcí stroj (obráběcí anebo, multifunkční centrum) použita např. vidlicová hlava (obr. 13), případně jiná hlava, znamená to, že na daném stroji je výrazným způsobem povýšena jeho technologická adaptibilita, tj. schopnost obrábění z více stran (obr. 14). Pro uživatele to znamená že:

- redukuje počet strojů nutných pro obrobení polotovaru obrobku;
- snižuje energetickou náročnost při obrábění (méně strojů v provozu při obrábění dané součásti);
- eliminuje ztrátové časy při přepínání obrobku;
- zvyšuje přesnost obrábění.



Obr. 13 Portálové obráběcí centrum – typický představitel pro rotační osy v nástroji [Zimmermann]

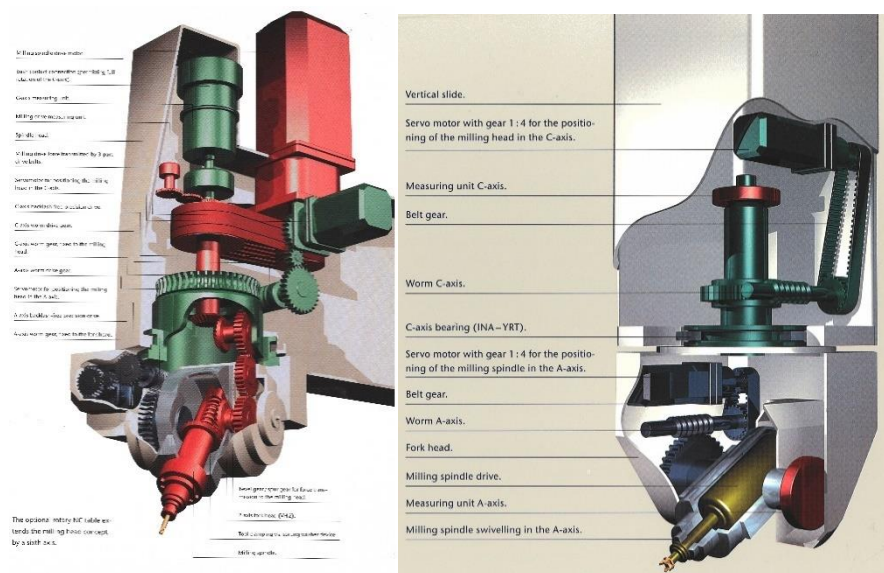


Obr. 14 Technologická adaptibilita dosažená aplikací hlav [Danobat]

Jestliže je CNC obráběcí schopen obrábět v 5D režimu, je rotační osou kromě náhonu vřetena i jeho polohování ve dvou rotačních osách. Pak je pro jeho náhon polohování použit (obr. 15):

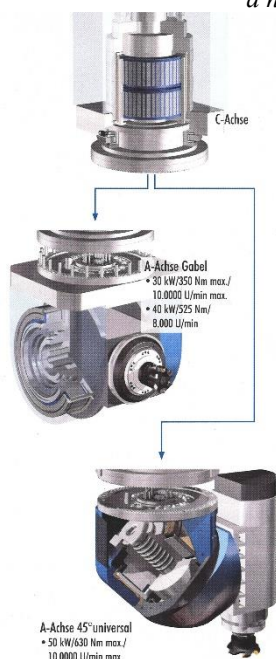
- mechanický princip;
- kombinovaný princip;
- vestavěný motor.

Jak je z obrázku patrné, je pro náhon vřetena použit v závislosti na způsobu náhonu vřetena princip mechanický anebo s vestavěným motorem.



*mechanický náhon polohování
a mechanický náhon vřetena*

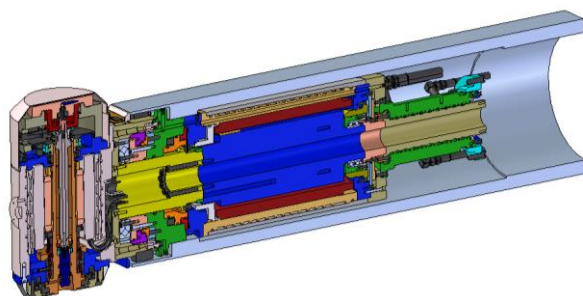
*mechanický náhon polohování
a náhon vřetena vestavěným motorem*



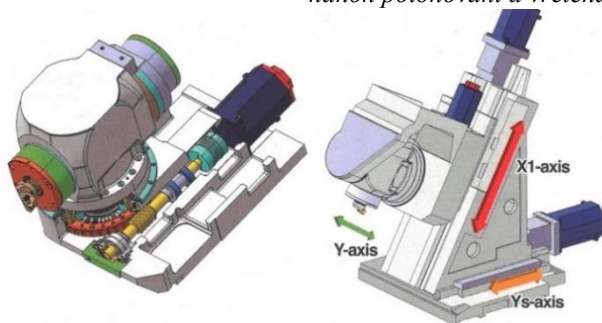
náhon polohování a vřetena vestavěným motorem

Obr. 15 Způsoby náhonu vřetena frézovacího CNC obráběcího centra pracujícího 5D technologií obrábění [Zimmermann], [Cytec]

U soustružnických multifunkčních obráběcích center jsou používány pro naklápění vřetena (B osa) buď vestavěné motory, nebo přírubové motory nahánějící většinou šnekový převod – obr. 16. Pro náhon vřetena je v obou případech použit vestavěný motor – tzv. elektrovřeteno. Stroj pak má čtyři řízené osy – 4D obrábění.



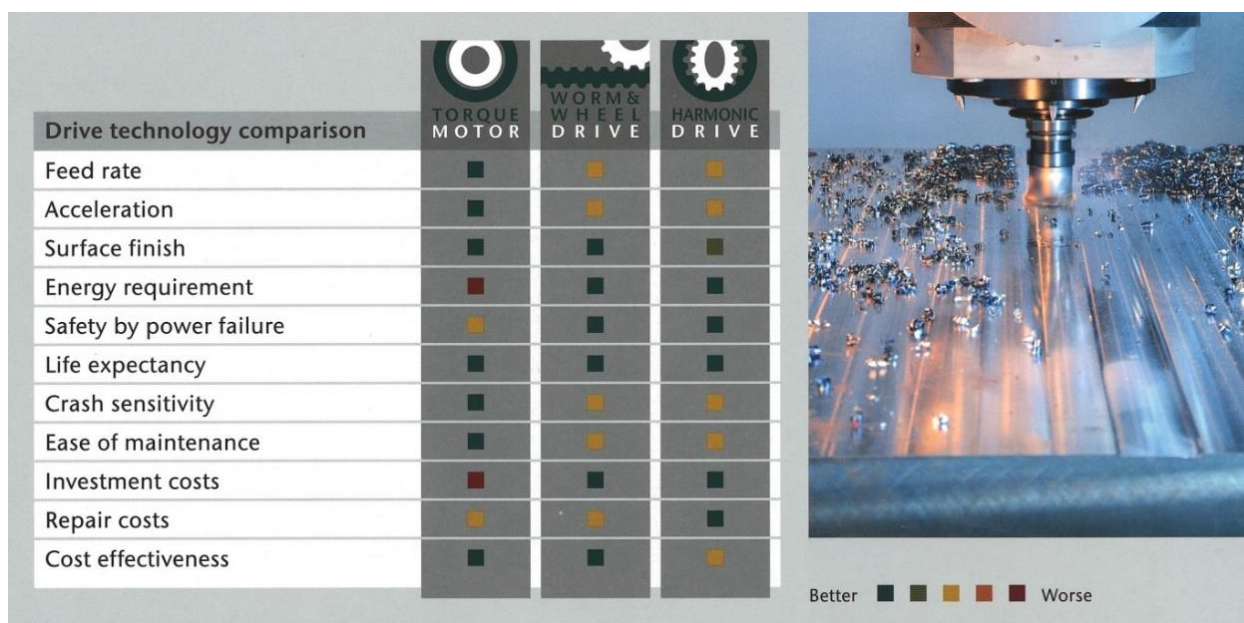
náhon polohování a vřetena vestavěným motorem



mechanický náhon polohování, náhon vřetena vestavěným motorem

Obr. 16 Způsoby náhonu a naklápění vřetena soustružnického multifunkčního CNC obráběcího centra pracujícího 4D technologií obrábění [DMG Mori], [Daewoo]

Výhody a nevýhody jednotlivých způsobů náhonů u víceosých hlav používaných pro CNC obráběcí stroje sumarizuje obr. 17.



Obr. 17 Porovnání způsobů náhonů naklápění vřetena frézovacího CNC obráběcího centra pracujícího 5D, nebo 4D technologií obrábění [Zimmermann]

2.2.4 Konstrukční provedení rotačních os pro obrobek

CNC obráběcí stroje, zejména pak obráběcí a multifunkční centra mají ve své stavbě nasazený rotační uzly pro obrobek ve formě:

- jednoosých souvisle řízených otočných stolů nasazovaných zejména ve stavbě svislých soustruhů, anebo frézovacích strojů s vodorovnou i svislou osou, které realizují tzv. 4D obrábění;
- dvouosých (rotačně naklápěcích) stolů pro frézovací stroje se svislou i vodorovnou osou, které realizují tzv. 5D obrábění.

Tento konstrukční uzel, vestavěný přímo do stroje jako jeho nedílná součást, anebo použitý jako odnímatelná část zvyšuje, podobně jako rotačně naklápěcí hlava technologickou adaptibilitu, což také znamená:

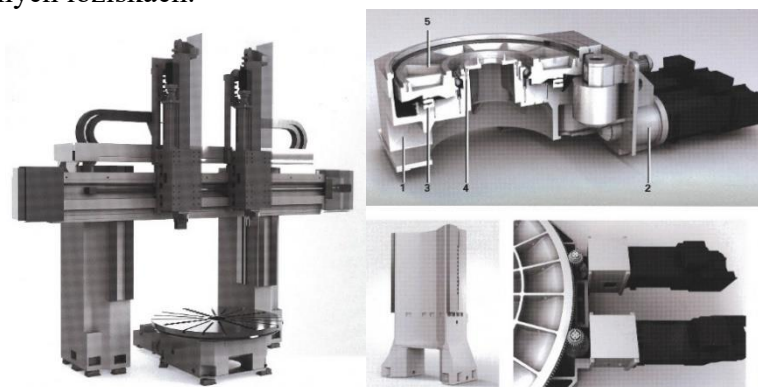
- redukci počtu strojů nutných pro obrobení polotovaru obrobku;
- snížení energetické náročnosti při obrábění (méně strojů v provozu při obrábění dané součásti);
- eliminaci ztrátových časů při přepínání obrobku;
- zvýšení přesnosti obrábění.

CNC obráběcí stroj schopný obrábět v 4D režimu, má pro náhon polohování použít:

- mechanický princip (obr. 18);
- kombinovaný princip;
- vestavěný motor (obr. 18, 19)

Deska rotačního stolu bývá uložena:

- ve valivých ložiskách (obr. 18);
- hydrostatických radiálně axiálních ložiskách (obr. 18);
- v kombinovaných ložiskách.

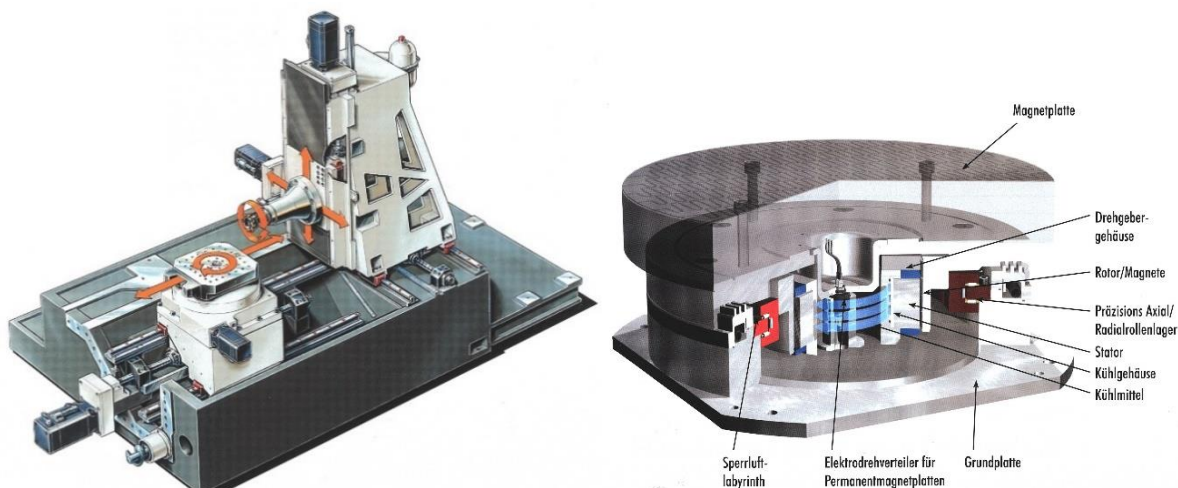


elektro mechanický náhon stolu v režimu Master Slave, radiálně axiální valivé ložisko



náhon stolu vestavěným motorem, radiálně axiální hydrostatické ložisko

Obr. 18 Způsoby náhonu a uložení desky stolu CNC soustružnického obráběcího centra pracujícího 4D technologií obrábění [Starrag], [Elha]

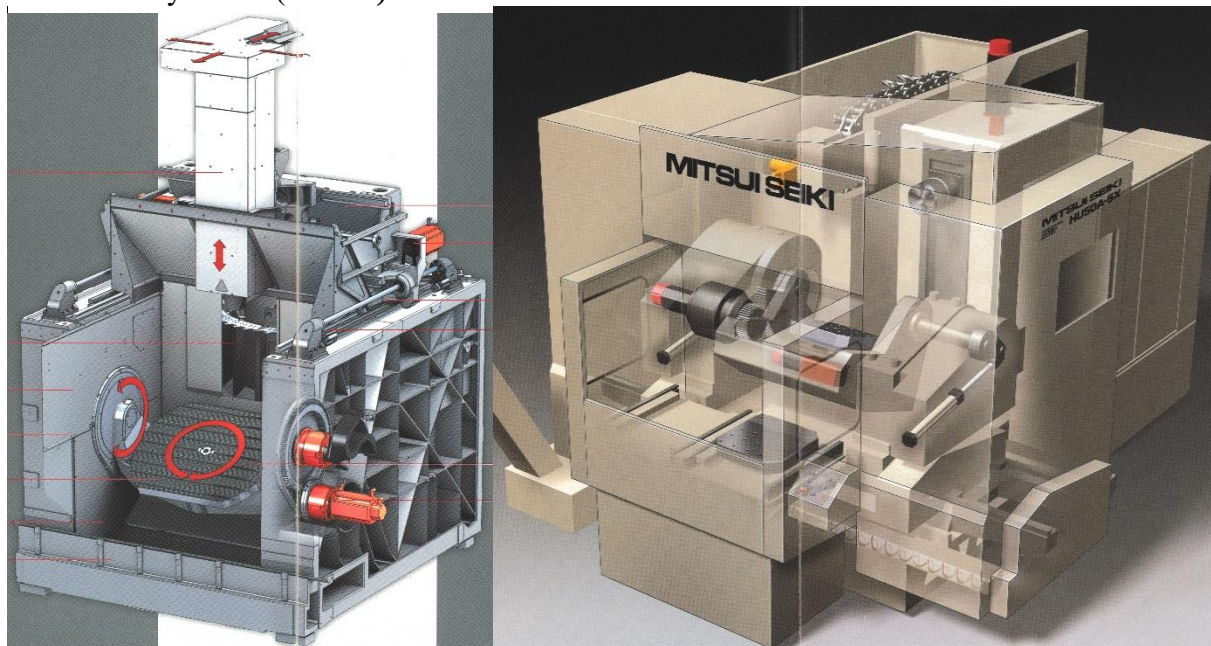


Obr. 19 Způsoby náhonu a uložení desky stolu CNC frézovacího obráběcího centra pracujícího 4D technologií obrábění [Starragheckert], [Cyttec]

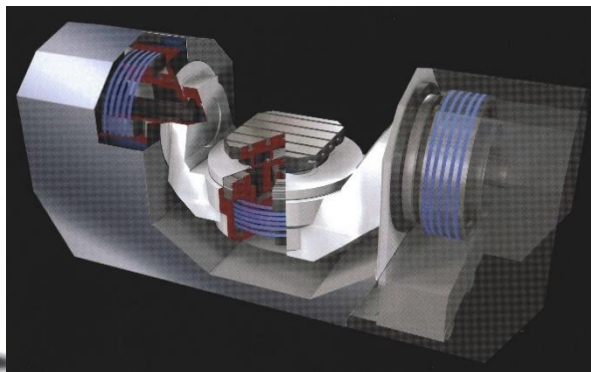
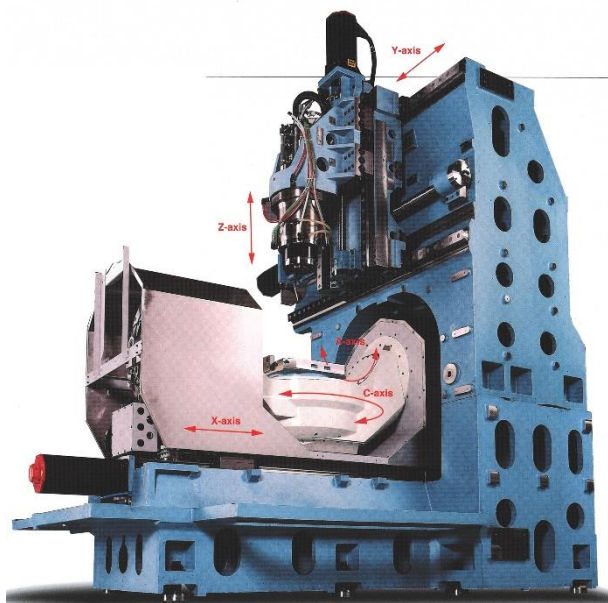
Jestliže je frézovací CNC obráběcí schopen obrábět v 5D režimu, je obrobek polohován ve dvou rotačních osách (rotačně kyvné). Tento typ stolu může být aplikován jak pro svislou, tak i vodorovnou osu vřetena – obr. 20.

Pro jeho náhon polohování rotace a naklápění stolu je použit:

- mechanický princip (obr. 20);
- kombinovaný princip;
- vestavěný motor (obr. 21).

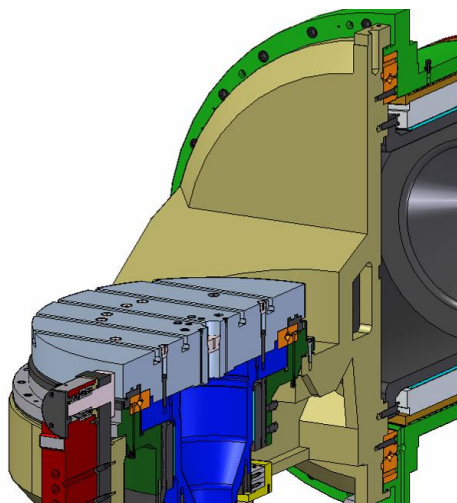


Obr. 20 Rotačně naklápěcí stoly s mechanickým náhonem u svislého a vodorovného CNC frézovacího obráběcího centra pracujícího 5D technologií obrábění [Hermle], [Mitsui Seiki]



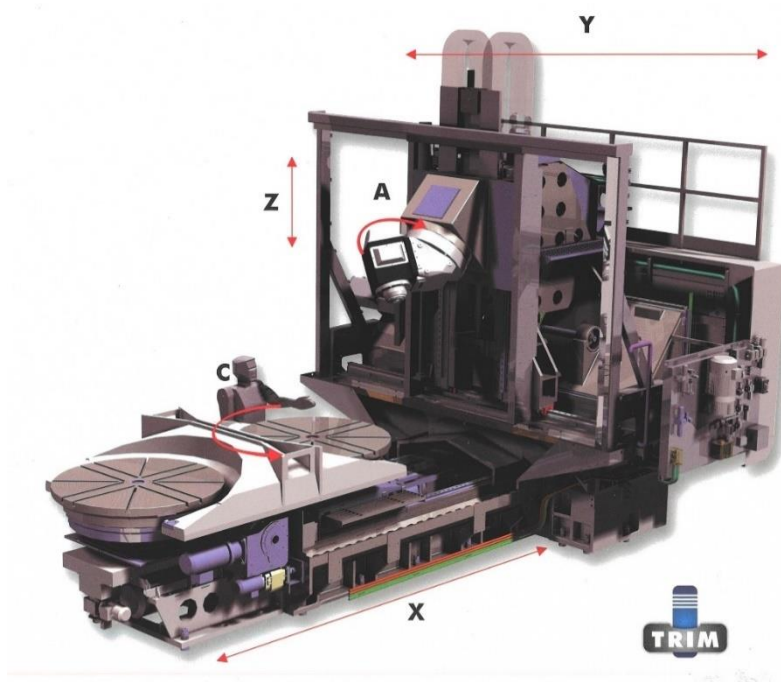
Obr. 21 Rotačně naklápěcí stoly s náhonem vestavěným motorem u svislého CNC frézovacího obráběcího centra pracujícího 5D technologií obrábění [Makino]

Konstrukční principy uvedené na obr. 20 a obr. 21 je provedení, kterému se v technickém slangu říká kolébka. Existuje však i řešení, kdy je do rotační osy vestavěna druhá rotační osa - obr. 22. Uložení stolu je letmé, avšak výrobci deklarují dostatečnou tuhost



Obr. 22 Rotačně naklápěcí stůl s náhonem vestavěným motorem u svislého CNC frézovacího obráběcího centra pracujícího 5D technologií obrábění [DMG Mori]

Někdy v případě strojů pro 5D obrábění je použita jedna rotační osa a druhá je pak konstrukčně provedena ve vřetení – obr. 23.



Obr. 23 Rotační stůl a universální hlava u svislého CNC frézovacího obráběcího centra pracujícího 5D technologií obrábění [Trim]

2.3 MĚŘENÍ ATRIBUTŮ CNC OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

2.3.1 Přesnost měření

Přesnost je kvalitativní pojem, který se váže na konkrétní technickou veličinu a norma TNI 01 0115 říká, že je to těsnost shody mezi naměřenou a pravou hodnotou měřené veličiny. Pravá hodnota je neurčitého charakteru a není zjištělná, protože neexistuje absolutně přesné měřidlo a není možno realizovat ideální podmínky měření. Obecně platí, že konečný výsledek je tím přesnější, čím je počet naměřených hodnot větší. Nelze ovšem mechanicky zvyšovat počet měření, neboť při porušení podmínek měření se naopak přesnost snižuje [2][6].

Při vyjadřování přesnosti měření je nezbytně nutné vycházet z opakovaných měření provedených za specifických podmínek. Opakovatelnost měření je těsnost shody mezi výsledky po sobě následujícími měření téže měřené veličiny, provedených za stejných podmínek. Musí být tedy dodržen: tentýž postup měření, tentýž pozorovatel, tentýž měřicí přístroj, totéž místo, opakování v průběhu krátké časové periody atd. Reprodukovatelnost měření je těsnost shody mezi výsledky měření téže veličiny provedenými za změněných podmínek měření. Mezi změněné podmínky měření lze zahrnout: princip měření, metodu měření, pozorovatele, měřicí přístroj, referenční etalon, místo, podmínky použití, čas [2][8].

Na popis přesnosti měření lze nahlížet pomocí dvou pojetí. Při chybovém pojetí je pravá hodnota měřené veličiny považována za jedinečnou a v praxi nepoznatelnou. Také říká, že měření můžeme prohlásit za přesnější, když nabízí menší chybu měření. Naproti tomu máme nejistotové pojetí, které připouští, že neexistuje jediná pravá hodnota měřené veličiny, ale spíše soubor pravých hodnot ve shodě s definicí. Tento soubor je z principu a v praxi nepoznatelný. Při tomto pojetí můžeme přesnost měření prohlásit za přesnější, když nabízí menší nejistotu měření [10][13].

A. Chybové pojetí

Chyba měření (CHM) je dle normy TNI 01 0115 definována jako naměřená hodnota veličiny mínus referenční hodnota. Tuto „odchylku“ tedy můžeme nazývat chybou měření. Výsledky minimálně 5 - ti měření po sobě, prováděné za podmínek opakovatelnosti, se zpravidla řídí zákonem normálního rozdělení, což platí i o chybách měření. Chyby měření můžeme klasifikovat jako hrubé, systematické (SCHM) a náhodné (NCHM) [2] [8].

Chyby si dle výskytu můžeme rozdělit na hrubé, systematické a náhodné.

• Chyby hrubé

Chyby hrubé jsou naprosto nepřipustné a platí zásada, že těchto chyb se nesmí při měření kontrolor dopustit. Svou absolutní hodnotou výrazně převyšují očekávanou hodnotu chyb. Měření s těmito chybami se vyznačuje nápadnými rozdíly v naměřených hodnotách. Při jejich zjištění je nutné měření zastavit, chyby odstranit a měření zopakovat. Výskyt hrubých chyb je často doprovázen dalšími viditelnými a negativními projevy jako jsou např. viditelné poškození měřícího zařízení, nezpůsobilost nervozita a stres kontrolora nebo práce v nevhodných okolních podmínkách (teplota, proudění vzduchu atd.). Zásahy, které vedou k odstranění chyb, musí být zásadní, jako je výměna měřícího zařízení, kontrolora nebo změna místa a času měření. Odhalení příčin hrubých chyb a jejich odstranění nebývá složité, ale z hlediska metrologie jde zpravidla o primární a nejjednodušší krok v celém procesu zvyšování přesnosti měření [14][15].

• Chyby systematické

Systematická chyba je složka chyby měření, která v opakovaných měřeních zůstává konstantní nebo se mění předvídatelným způsobem [10]. Tyto chyby jsou pravidelné, při stejných okrajových podmínkách opakovatelné a vznikají z příčin, které ovlivňují výsledek. Podle své povahy mohou systematické chyby být [14]:

- stálé – nezávislé na velikosti měření veličiny;
- jednostranné – mají stejný smysl, ale proměnlivé hodnoty;
- pravidelné – smysl i hodnota se řídí dle určitého fyzikálního zákona.

Zásadní vlastností systematických chyb je jejich stálost (za nezměněných podmínek) a možnost odhalení jejich příčin. Pokud je chyba nestabilní co do velikosti i znaménka, je nutné ji zařadit mezi chyby náhodné [15]. Hodnotu systematické chyby lze zjistit tak, že se provede série N měření za podmínek opakovatelnosti a výsledek měření se vypočte jako aritmetický průměr. Od toho se odečte pravá hodnota získaná například měřením pomocí etalonu. Pro praxi je zjištění systematické chyby velmi důležité pro zpřesňování výsledků měření. Přesnost odhadu střední hodnoty je tím větší, čím je větší počet opakovaných měření[2].

• Chyby náhodné

Chyba náhodná je složka chyby měření, která se v opakovaných měřeních mění nepředvídatelným způsobem a nelze plně vyloučit i sebelepším měřením, protože nejsou pravidelné a za stejných podmínek opakovatelné. V praxi lze provést pouze odhad náhodné chyby. Jsou výsledkem současného působení drobných a nepostižitelných vlivů. Náhodné chyby mají neznámou příčinu a jsou tedy nepoznatelné a nepředvídatelné co do velikosti i znaménka.

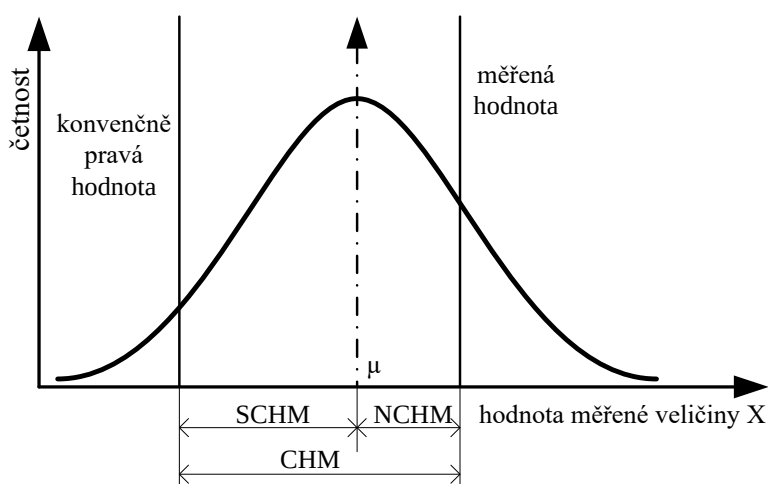
Referenční hodnotou veličiny pro náhodnou chybu měření je aritmetický průměr, který by se získal z nekonečného počtu opakovaných měření téže měřené veličiny. Náhodná chyba měření se vypočte dle vztahu 1.

$$NCHM = CHM - SCHM \quad (1)$$

Vznikají tam, kde má systém měření slabiny (především u kontrolora) a kde nebyly odhaleny dosud neznámé či opomenuty nebo zanedbány některé vlivy známé. Úkolem kontrolora je statistické vyhodnocování náhodných chyb a jejich sledování v čase. Pokud se podaří odhalit některou z dříve neznámých příčin či vlivů, podílejících se na výskytu náhodné chyby, pak je důsledkem odhalení tohoto vlivu převedení „části“ náhodných chyb do systematických. To vede ke zvýšení přesnosti měření [8][14][15].

Celková chyba měření (obr. 24) se skládá z chyby systematické a náhodné dle vztahu:

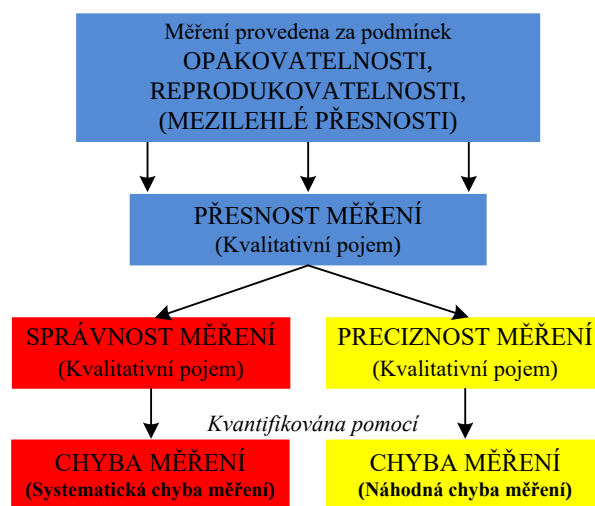
$$CHM = SCHM + NCHM \quad (2)$$



Obr. 24 Grafické vyjádření chyby měření [8]

Základní rozdělení chyb také naznačuje postup při jejich zpracování. Činnost kontrolora by se tedy měla skládat z následujících kroků [15]:

- odhalení a identifikace hrubých chyb a zásah do systému měření, které vede k jejich vyloučení;
- identifikace systematických chyb a jejich odstranění kompenzací;
- provedení rozboru náhodných chyb. Při odhalení některé příčiny z této skupiny ji převést do skupiny systematických chyb. Zbývající náhodné chyby podrobit statistickému zpracování.



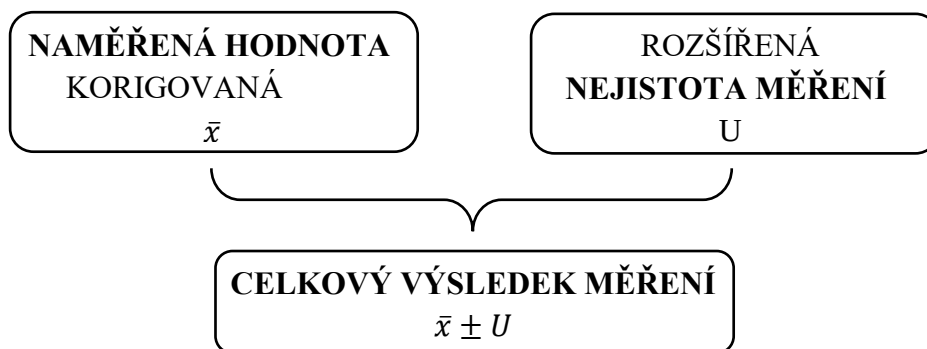
Obr. 25 Přesnost měření – Chybový přístup [13]

Přesnost měření (obr. 25) prováděné za podmínek opakovatelnosti je ovlivněno správností a precizností měření kvantifikované pomocí chyb měření. Správnost měření je těsnost shody mezi aritmetickým průměrem nekonečného počtu opakovaných naměřených hodnot veličiny a referenční hodnotou veličiny. Správnost není veličinou a je nepřímo vztažena k systematické chybě měření, ale ne k náhodné chybě. Preciznost měření je těsnost shody mezi indikacemi nebo naměřenými hodnotami veličiny získanými opakovanými měřeními na stejném objektu nebo na podobných objektech za specifikovaných podmínek (podmínky opakovatelnosti nebo reprodukovatelnosti, podmínky mezilehlé preciznosti). Je zpravidla vyjádřena číselně, např. směrodatnou odchylkou, rozptylem nebo variačním koeficientem [10][13].

Proces poznání, zpracování a odstranění chyb nemůže být jednorázovou záležitostí prováděnou před zahájením měření. Chyby, stejně jako mnoho dalších faktorů ovlivňující proces měření, mají svůj vývoj v čase. Pokud jim není věnována soustavná pozornost, dojde často ke zvětšování rozptylu chyb náhodných, ke změnám hodnot chyb systematických nebo k častějšímu výskytu chyb hrubých [15].

B. Nejistotové pojetí

Nejistota měření je nezáporný parametr, který charakterizuje rozptýlení hodnot. Základem je pravděpodobnostní princip, který předpokládá, že nejistota měření pokryje skutečnou hodnotu s předpokládanou pravděpodobností. Hodnota získaná měřením se pravé pouze přibližuje. Proto je třeba k výsledku měření (obr. 26) ještě uvádět informaci o nejistotě měření, která definuje interval, symetrický kolem naměřené hodnoty, ve kterém s danou pravděpodobností leží hledaná pravá (skutečná) hodnota veličiny [2][6][8]. Při vyjadřování přesnosti měření je nezbytně nutné vycházet z opakovaných měření provedených za specifických podmínek. Vyhodnocování naměřených hodnot se provádí pomocí metod matematické statistiky, které garantují spolehlivost výsledku měření. Největší důležitost v matematické statistice má normální (Laplaceovo - Gaussovo) rozdělení, které je na obr. 27 [2].



Obr. 26 Celkový výsledek měření upraven dle [8]

- **Standardní nejistota typu A (u_a)**

Standardní nejistota typu A (u_a) se získá z opakovaných měření jako směrodatná odchylka. Její hodnota s počtem měření n klesá. Při nezávislých (nekorelovaných) naměřených hodnotách se standardní nejistota váže na výběrový průměr $\bar{x}$ (aritmetický průměr) a zjistí se výpočtem směrodatné odchylky výběrového průměru $s(\bar{x})$ [13][16] dle vztahu:

$$u_a = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (3)$$

- **Standardní nejistota typu B (u_b)**

Standardní nejistota typu B (u_b) je nezávislá na počtu měření a je určena standardizací z možných zdrojů nejistot na základě [13][16]:

- nejistot uvedených v ověřovacích listech etalonů, stanovených měřidel, v kalibračních listech, certifikátech apod;
- nejistoty uvedené ve výsledcích předchozích měření;
- nejistoty určení tabulkových koeficientů;
- specifikace metrologických vlastností měřidel výrobců;
- zkušeností.

- **Kombinovaná standardní nejistota**

Známe – li nejistoty obou typů, tak můžeme určit hodnotu kombinované standardní nejistoty u_c . Kombinovaná standardní nejistota je kladnou druhou odmocninou ze součtu standardních nejistot u_a a u_b dle vztahu [16]:

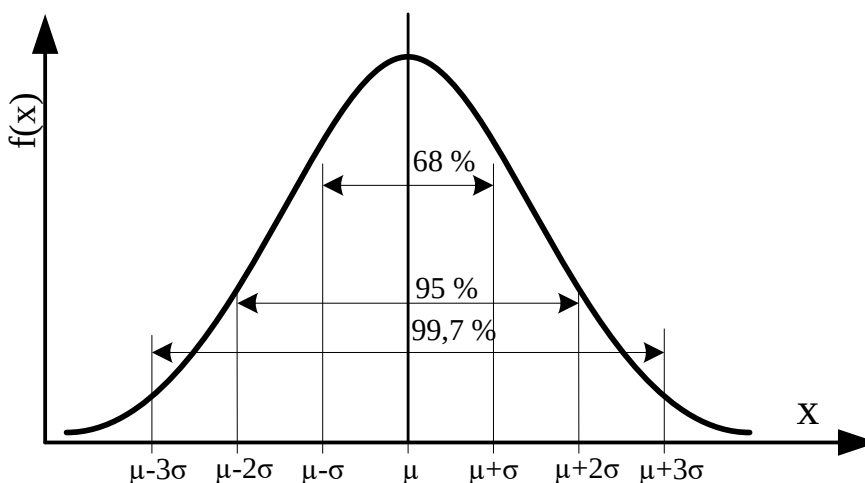
$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad (4)$$

- **Rozšířená nejistota**

Standardní nejistota charakterizuje nejistotu intervalem, jehož překročení (odlehlost skutečné hodnoty od udávané hodnoty) má poměrně velkou pravděpodobnost. Praxe proto upřesňuje charakteristiku nejistoty intervalem, jehož překročení má malou pravděpodobnost a hovoří se o rozšířené nejistotě. Rozšířená nejistota U se spočítá součinem kombinované nejistoty u_c a koeficientu rozšíření (pokrytí) k_u dle vztahu [16]:

$$U = k_u \cdot u_c \quad (5)$$

Na obr. 27 je zobrazeno normální (Laplaceovo - Gaussovo) rozdělení se zobrazením pravděpodobnosti pokrytí. Pokud ve vztahu pro výpočet rozšířené nejistoty (5.) bude použit koeficient rozšíření 1, tak to znamená, že soubor pravých hodnot měřené veličiny je v intervalu s pravděpodobností 68,27 %. Analogicky lze použít koeficienty 2 (95,45 %) a 3 (99,73 %).



Obr. 27 Normální (Laplaceovo – Gaussovo) rozdělení

Máme-li naměřenou hodnotu X (korigovanou, získanou zpravidla jako aritmetický průměr ze série měření za podmínek opakovatelnosti) a výslednou rozšířenou nejistotu U , pak se pravá hodnota měřené veličiny bude nacházet v intervalu $<X - U; X + U>$ s danou pravděpodobností (v praxi to většinou bývá 95 %) [2].

2.3.2 Přesnost CNC obráběcích strojů

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 [3]:

- vibracemi;
- nečistotami;
- teplem.

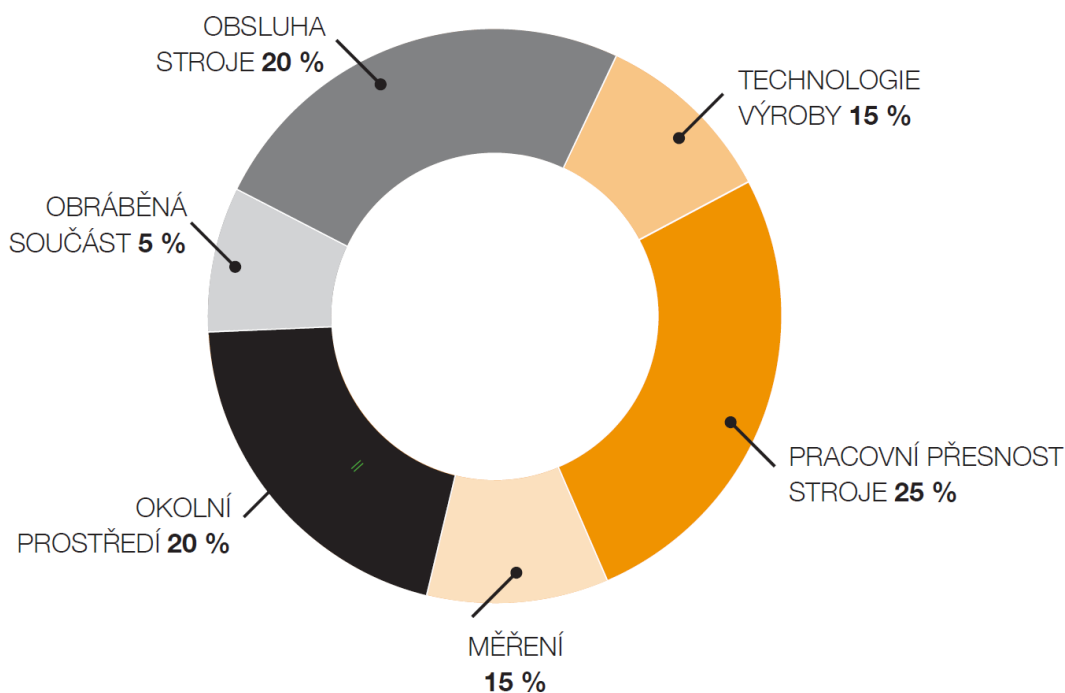
Stejnými vlivy může stroj naopak působit na okolí. Stroj může způsobovat vibrace (není to běžné), zplodiny vznikající při přívodu chladicí a řezné kapaliny k místu řezu, a také může způsobovat oteplování okolí. Nečistotou nemyslíme hrubou nečistotu a nadměrnou prašnost, ale standardní prostředí běžného 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 [3]:

- 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. 28 z literatury [3].



Obr. 28 Vlivy působící na přesnost výroby CNC obráběcího stroje [3]

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 dodržением požadovaných tolerancí a drsností povrchu [5],[7]. 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.

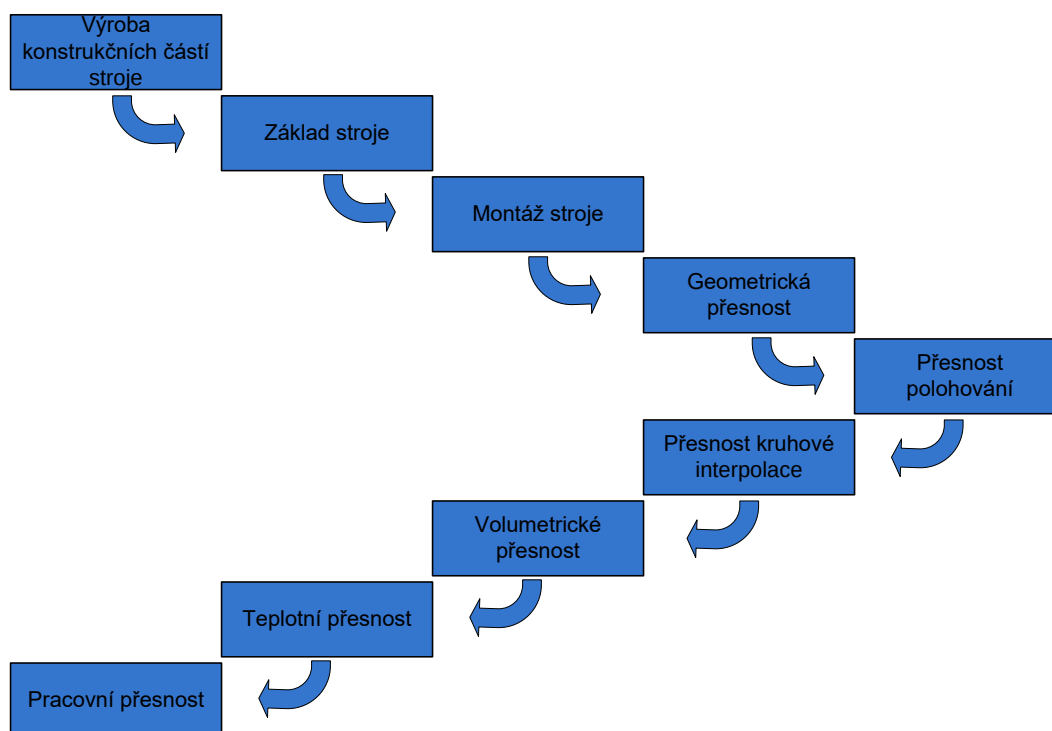
Tyto přesnosti obráběcích strojů a zejména pak pracovní přesnost obráběcího stroje velmi významně ovlivňují dva vlivy a sice:

- 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 [9].

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. 29.



Obr. 29 Návaznost přesností u obráběcích strojů

Obr. 29 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.

2.3.3 Geometrická přesnost CNC obráběcích strojů

Geometrická přesnost je daná přesností tvaru a polohy jeho jednotlivých součástí a jejich vzájemným pohybem. Zkoušky geometrické přesnosti obráběcího stroje zahrnují zjišťování všech odchylek tvaru a polohy jeho jednotlivých částí na smontovaném stroji v nezatíženém stavu, tedy ve stavu bez zatěžujících sil vzniklých při obrábění [7]. Chyba je charakterizována jako odchylka skutečné polohy od požadované mezi obrobkem a nástrojem. Chyby můžeme rozdělit do dvou kategorií – kvazi - statické a dynamické chyby.

Kvazi - statické jsou chyby mezi nástrojem a obrobkem, které se pomalu mění s časem a týkají se struktury obráběcího stroje (geometrické, kinematické a teplotní chyby, atd.). Dynamické jsou závislé na podmínkách operace obrábění (vibrace stroje, chyba pohybu vřetena). Kvazi - statické chyby tvoří přibližně 70 % všech chyb obráběcího stroje [5]. Geometrická přesnost popisuje geometrickou strukturu obráběcího stroje, ze které je možné vyhodnotit vlastnosti funkčních částí ovlivňující jeho pracovní přesnost. Také popisuje kvalitu výroby stroje a jeho montáž v nezatíženém stavu. Zkoušky jsou prováděny u strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění [2][6].

Před samotným měřením musí stroj dle normy ČSN ISO 230-1 splňovat určité zkušební podmínky. Před započítím zkoušky musí být stroj kompletně smontován na vhodném základě, plně funkční a vyrovnaný do vodorovné polohy dle návodu výrobce. Cílem vyrovnaní do vodorovné polohy je získat staticky stabilní polohu stroje, která usnadní měření, především vztahující se k přímosti některých částí. Zkoušky se provádí na kompletně dokončeném stroji, demontáž některých částí může být provedena jen ve výjimečných případech v souladu s instrukcemi výrobce. Měření by mělo probíhat v prostředí s přijatelnými vibracemi. Záměrem zkoušek je měřit přesnost stroje za podmínek velmi blízkých jeho normálním pracovním podmínkám. Výrobce stroje by měl předložit pokyny týkající se charakteru teplotního prostředí, které je akceptovatelné pro splnění specifikované přesnosti stroje. Takové pokyny by měly obsahovat například specifikace průměrné teploty místnosti, největší rozsah amplitudy a frekvence odchylek od této průměrné teploty a environmentální teplotní gradienty. Odpovědností uživatele je, zajistit akceptovatelné teplotní prostředí pro provoz a pro provedení zkoušení v místě instalace. Ideálně se všechna měření provádějí za podmínek, kdy jak měřicí přístroje, tak měřený objekt jsou umístěny v prostředí s teplotou 20 °C [2][17].

2.3.3.1 Přesnost polohování CNC obráběcích strojů

Přesnost polohování stanovuje přesnost a opakovatelnost najetí do požadované polohy u lineárních a rotačních číslíkově řízených osách. Metody zkoušení specifikuje například norma ČSN ISO 230 – 2, VDI 3441 nebo další mezinárodní normy. Měření by mělo být uspořádáno tak, aby byl měřen relativní pohyb mezi součástí nesoucí nástroj a součástí nesoucí obrobek ve směru pohybu měřené osy. Dle velikosti měřené osy se nastaví počet zadaných poloh.

Pro lineární osy menší než 2000 mm musí těchto poloh být minimálně pět a pro rotační osy s rozsahem do 360° musí být poloh minimálně osm. Při měření přesnosti polohování se stroj pohybuje po zadané poloze (P_i) a je zde změřena skutečná poloha (P_{ij}). Z těchto hodnot se vypočte polohová úchylka (x_{ij}).

Měření může být provedeno jako jednostranné, tzn., že nastavování do zadané polohy v ose probíhá vždy ve stejném smyslu pohybu. Při dvoustranném měření probíhá nastavování zadané polohy v ose v obou smyslech pohybu. Měření musí být provedeno na nezátíženém stroji, který je ve vhodném teplotním prostředí dle pokynů výrobce (stejně jako u měření geometrických chyb). Dále musí být zvolena vhodná rychlost přestavování optiky s prodlouženou na změřenou skutečnou polohu [2].

2.3.3.2 Přesnost kruhové interpolace u CNC obráběcích strojů

Teoreticky platí, že pokud by byl CNC stroj dokonale přesný, pak by kruhová dráha stroje přesně odpovídala naprogramované kruhové dráze. V praxi ale kterákoli z chyb (chyba odměřování, přímosti, vůle, reverzační špičky atd.) způsobí to, že se poloměr kruhu od naprogramovaného kruhu odchýlí. Pokud jsme schopni přesně změřit skutečnou kruhovou dráhu a srovnat ji s naprogramovanou (jmenovitou) dráhou, získali by jsme měřítko přesnosti obráběcího stroje. Měřením a vyhodnocením přesnosti kruhové interpolace se zabývá například norma ČSN ISO 230 - 4. Účelem zkoušek je poskytnout metodu pro odhad vlastností tvorby obrysu číslicově řízených obráběcích strojů. Tyto chyby jsou ovlivněny geometrickými chybami a dynamickým chováním stroje při použití posuvu. Výsledky jsou viditelné na obráběných dílech při ideálních podmínkách obrábění, jestliže průměr a posuv jsou totožné jak pro obrábění, tak pro zkoušku interpolace.

Zkouška probíhá tak, že měřicí zařízení se pohybuje pro číslicově řízené a programované kruhové dráze (jmenovitá dráha), které je definována průměrem. Skutečná dráha je vytvářena strojem při zadaném programu po jmenovité dráze [2][17].

2.3.3.3 Volumetrická přesnost CNC obráběcích strojů

Volumetrická přesnost obráběcích strojů je reprezentována vektorovou mapou chybových odchylek v pracovním prostoru. V normě ČSN ISO 230-1 je pojem volumetrická přesnost pro tříosé centrum definován jako maximální rozsah relativních odchylek mezi skutečnou a ideální polohou ve směru os X, Y, Z a maximální rozsah orientace úchylek pro směry os A, B, C pro pohyby v osách X, Y, Z v určeném objemu, kde odchylky jsou relativními odchylkami mezi stranou nástroje a stranou obrobku obráběcího stroje pro specifikované vyrovnání primárních a sekundárních os [2][6].

Metoda v normě ČSN ISO 230 – 6 stanovuje zkoušky diagonálního přestavení, které umožňují odhadnutí volumetrických vlastností obráběcího stroje. Úplné vyzkoušení volumetrických vlastností obráběcího stroje je složitý a časově náročný proces. Proto byly vymyšleny zkoušky diagonálního přestavení, které redukuje čas spojenou se zkouškami volumetrických vlastností, avšak nejsou plnohodnotnou náhradou [2] [6].

2.3.3.4 Vliv teploty a vibrací

Každý CNC obráběcí stroj je během své práce, ale i v klidovém režimu vystaven teplotnímu působení ať rovnoměrnému, tak nerovnoměrnému. Díky tomuto teplotnímu působení pak vznikají teplotní deformace, které vedou ke změně polohy obrobku vůči nástroji a tím k nepřesnostem. Toto bude markantní, pokud budeme chtít při menší sérii obrobků stálost obráběného rozměru, případně dodržení úchylek tvaru a polohy definovaných na obráběné součásti.

Příčiny oteplování jednotlivých částí obráběcího stroje lze hledat buď ve stroji samotném (pasivní odpory v pohybových osách anebo samotný řezný proces), případně mimo něj. Teplotní stabilita obráběcích strojů je dnes většinou nejdůležitějším faktorem pro zachování zadaných tolerancí u obrobku [9].

Téměř veškerá mechanická práce, která je vykonána v řezném procesu se mění v teplo. Kromě toho vznikají ztráty v pohybových skupinách stroje. Odvod tepla se děje z místa vzniku (řezný proces anebo v pohonech, vedení) [9]:

- vedením (kondukcí);
- prouděním (konvekcí);
- sáláním (radiací).

Z řezného procesu odchází teplo:

- třískou;
- obrobkem;
- nástrojem;
- prostředím.

Z uvedeného vyplývá, že téměř všechno teplo se akumuluje v obráběcím stroji a je nutné ho odvést, či stabilizovat. Může vzniknout nestejnoměrné oteplení částí obráběcího stroje, což může vést k teplotním dilatacím a deformacím. Tato skutečnost se potom projeví na kolísání rozměrů obrobku a tolerancí úchylek tvaru a polohy. Všechny teplotní vlivy způsobují při provozu obráběcího stroje zvyšování teploty, která se ustálí potom na určité hodnotě – tzv. ustálené teplotě, která je u každého stroje jiná. Proto někteří výrobci trvají na tomto stavu a potom doporučují obrábět. Musí ovšem zajistit, že potom nedojde k náhlým změnám teploty. Na škodu obráběcímu procesu nemusí být teplota samotná, ale spíše škodí změny teploty během obrábění. Z těchto důvodů někteří výrobci své stroje kromě účinného chlazení, také ohřívají [9].

Tomuto stavu říkáme teplotně stabilizovaný obráběcí stroj. Studený obráběcí stroj se ohřívá pomalu, protože nemůžeme při počátku obrábění docílit plynulého provozu a rovnoměrného vytížení obráběcího stroje. Obrábění musí být totiž často přerušeno a tím dochází ke chladnutí. Proto se stroj teplotně stabilizuje tak, že je nejprve zahřát na provozní teplotu a posléze je kontrolována a udržována jeho teplota. Aby i přes teplotně stabilizovaný stav stroje změny teploty a její projevy tepelné deformace ovlivňovaly co nejméně polohu nástroje vůči obrobku a tím i přesnost obrábění tak [9]:

- volíme termo symetrickou konstrukci stroje;
- zvyšujeme účinnost všech uzlů a prvků, čímž minimalizujeme ztráty měnící se v teplo;
- zdroje tepla umístíme účelně tak, aby neovlivňovaly konstrukci stroje;
- teplo odvádíme chlazením, odvodem třísek, případně dimenzováním ploch pro účelný odvod tepla;
- kompenzujeme stroj;
- kontrolujeme proudění vzduchu a jeho teplotu, případně cloníme vnější tepelné záření.

Nežádoucími a škodlivými průvodními jevy časově proměnného zatěžování mohou být vibrace a tím také doprovodný jev těchto vibrací hluk stroje anebo jeho částí. Vibrace zhoršují pracovní podmínky pracovního procesu, zhoršují kvalitu opracovávaného povrchu a snižují trvanlivost břitů nástroje. Vibrace, které se vyskytují v obráběcích strojích, budeme označovat jako vynucené a samobuzené kmitání. Zdrojem vynuceného kmitání v obráběcích strojích je periodická síla.

Vynucené kmitání je nebezpečné pro vlastní konstrukci stroje, pokud se jeho frekvence či vyšší harmonické frekvence této síly, např. od řezného procesu, rovnají vlastním frekvencím technologické soustavy stroj – nástroj - obrobek. Pokud je zdroj vynuceného kmitání způsoben řezným procesem, lze potlačení následných vibrací uskutečnit volbou řezných podmínek. Je však nutné pamatovat na tu skutečnost, že např. vlastní frekvence obrobku se mohou někdy výrazně měnit v závislosti na hloubce odebírané třísky.

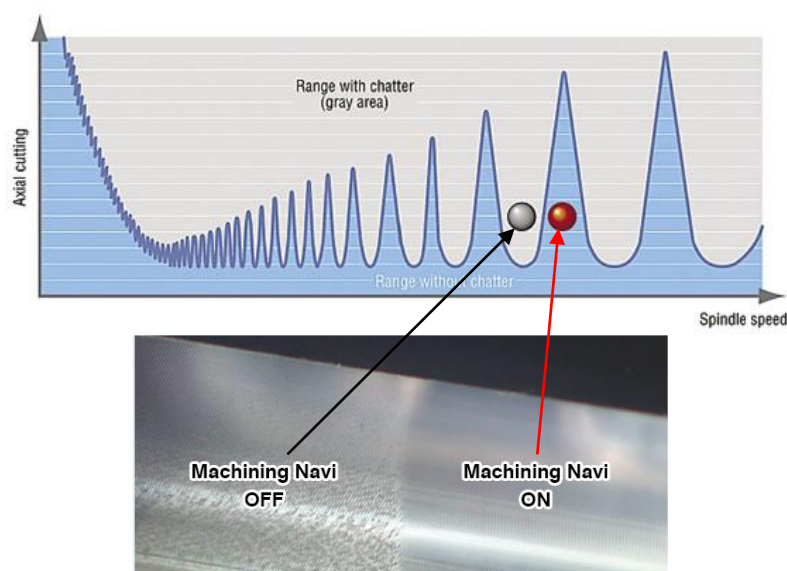
Stejně tak nemusí vyhovovat vlastní frekvence stroje, anebo vlastní frekvence upnutí nástroje ve vřetenu. Další možností jak potlačit vynucené kmitání je uložení stroje na pružném základě, nebo použitím tlumiče chvění [9].

Oproti tomu samobuzené kmitání omezuje kvalitu obrábění. Samobuzené kmitání stroje vzniká bez vnějšího přívodu energie (zdroje buzení), protože tato je brána ze vzájemného působení mezi obrobkem a nástrojem. Pokud existuje přebytek energie získané, tj. v případě, že je tato energie větší než energie spotřebovávaná, dochází k samobuzenému kmitání. To se projevuje jako drnčení (chatter) stroje. Chatter je způsoben řadou mechanismů.

Na obr. 30 je oblast s chatrem šedá, bez chatru modrá. Samobuzené kmitání se vyskytuje při hrubovacích i dokončovacích operacích. Neznamená to, že pokud bude odebírána menší hloubka třísky, tak se vyhneme samobuzeným kmitům. Například při odebírání malé hloubky třísky na svislém soustruhu (0,3 mm) při velkém vyložení smykadla na špičku nástroje (1500 mm) může dojít k samobuzenému kmitání.

Samobuzené kmitání se objevuje náhle. Změna stabilních podmínek řezného procesu na nestabilní, probíhá náhle. Stabilní podmínky se mění na nestabilní při překročení určité hodnoty hloubky třísky, která je nazývána mezní hloubka třísky. Základy teorie samobuzeného kmitání byly vypracovány v 50. letech minulého století ve VÚOSO Praha.

Základy položil J. Tlustý, M. Poláček a další. Teorie byla založena na rovnosti energií ve zpětnovazebním systému. Energie je generována řezným procesem, který je zdrojem buzení, a spotřebována vibracemi (setrvačné hmoty, pružiny a tlumiče, kterými lze systém nahradit).



Obr. 30 Diagram stability frézování stroje Genos [Okuma]

2.3.3.5 Pracovní (výrobní) přesnost

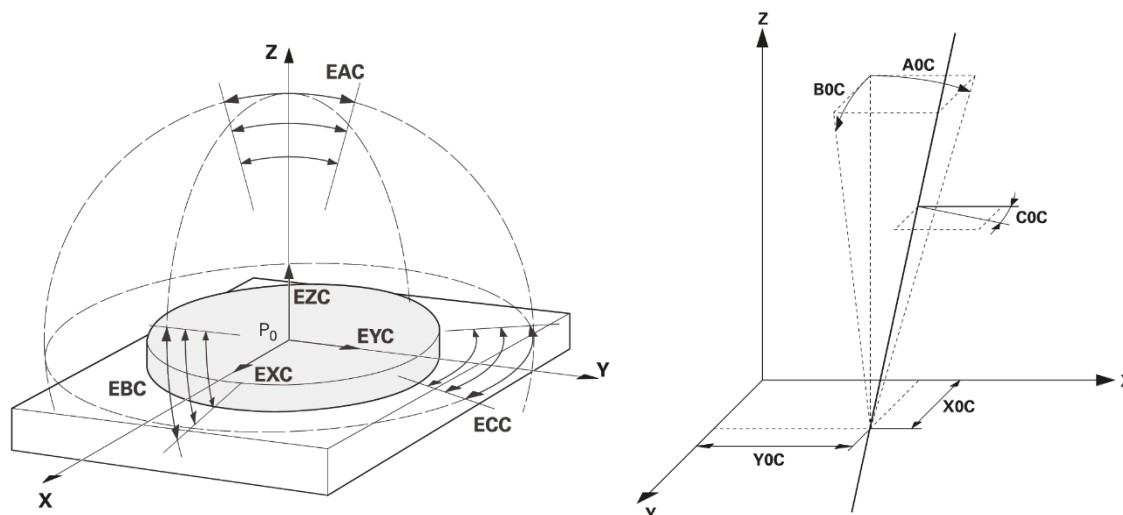
Pracovní přesnost je vlastnost obráběcího stroje, která vyjadřuje, s jakou kvalitou a produktivitou je stroj schopen obrobít zkušební kus u výrobce. Výrobní přesnost je vlastnost obráběcího stroje, která vyjadřuje, s jakou kvalitou a produktivitou je stroj schopen obrobít výrobek zákazníka. Popisuje tedy přesnost výrobního procesu, který je hodnocen na vyrobeném kusu.

Pracovní přesnost stroje je ovlivňována přesností relativní dráhy nástroje, geometrickou přesností stroje, přesností nastavování polohy nástroje vzhledem k obrobku (přesnost polohování), odolností stroje vůči pružným deformacím (vyvolaných řeznými silami, hmotností obrobku apod.), odolností stroje vůči teplotním dilatacím („teplotní stabilita“), volbou řezných podmínek, apod. [2][6].

Tyto zkoušky přesnosti se doporučují provádět v tepelně ustáleném prostředí a na stroji, který prošel zahřívacím cyklem. Odebírá se – li materiál ze zkušební obrobku vícekrát, doporučuje se, aby při odebrání dokončovací třísky souhlasili rozměry obrobku buďto s výkresem, který byl dohodnut v rámci přejímky mezi výrobcem stroje a zákazníkem, nebo např. s normou ČSN ISO 10791 – 7. Je důležité si uvědomit, že zkušební obrobek (váha, upnutí) může stroj lehce deformovat. Proto je třeba při přípravě na testování tyto vzít v úvahu. Dle dohody mezi výrobcem a zákazníkem může být testování provedeno v jakékoliv zvolené rovině obráběcího stroje. Vyhodnocení dosažené přesnosti se provádí mimo obráběcí stroj, a to nejčastěji na souřadnicovém měřicím stroji, který je daleko přesnější než obráběcí stroj [2].

2.3.4 Geometrické chyby rotačních os

Geometrické chyby rotačních os popisuje norma ČSN ISO 230 – 7. Tyto chyby jsou znázorněny na obr. 31 a skládají se z chyby pohybu rotační osy a chyby polohy. Chyby polohy jsou definovány jako statické chyby rotační osy. Tyto chyby popisují změnu umístění osy otáčení vlivem různých vlivů (teplota, zatížení atd.).



Obr. 31 Geometrické chyby rotační osy C [18]

Chyby pohybu rotační osy

- EXC – radiální pohyb ve směru osy X
- EYC – radiální pohyb ve směru osy Y
- EZC – axiální pohyb osy C
- EAC – naklonění kolem osy X (roll)
- EBC – naklonění kolem osy Y (pitch)
- ECC – chyba polohování

Chyby polohy – statické chyby rotační osy

- AOC – kolmost os C a Y
- BOC – kolmost os C a X
- COC – úhlová chyba osy
- XOC – chyba polohy osy C ve směru osy X
- YOC – chyba polohy osy C ve směru osy Y

2.4 POPIS MĚŘÍCÍCH ZAŘÍZENÍ UŽÍVANÝCH U CNC OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

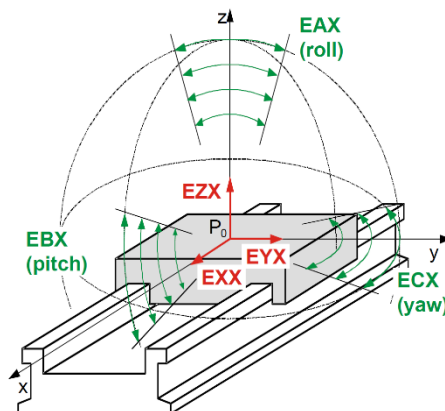
2.4.1 Měření přesnosti lineárních os obráběcích center

Stejně jako rotační osy, tak i lineární jsou zatíženy geometrickými chybami. Tyto chyby jsou znázorněny na obr. 32, konkrétně to jsou:

- chyba polohování – EXX;
- chyba přímosti ve směru osy Y – EYX;
- chyba přímosti ve směru osy Z – EZX;
- úhlová chyba naklápění (Roll) – EAX;
- úhlová chyba klopení (Pitch) – EBX;
- úhlová chyba natáčení (Yaw) – ECX.

Pokud vezmeme v úvahu tři – osu kinematiku jakéhokoliv obráběcího centra, tak tato obsahuje 18 geometrických chyb. K těmto chybám se přičtou vzájemné chyby kolmosti os a celkem tedy tři - osá kinematika obsahuje 21 geometrických chyb, které jsme schopni měřit a určit druh nápravy.

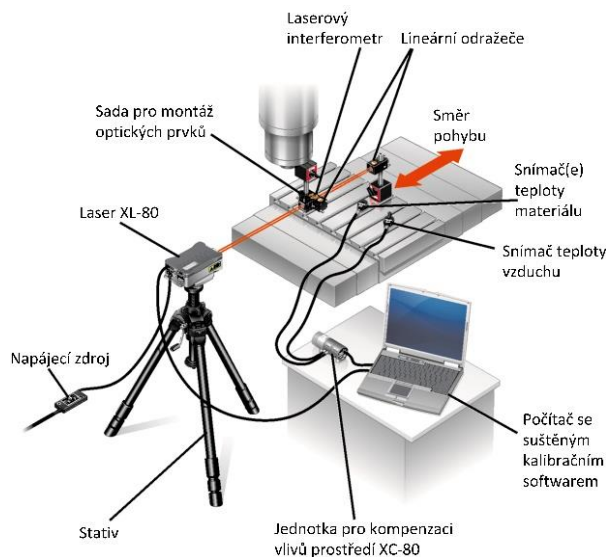
Měřicí zařízení a popisy měření pro jednotlivé geometrické chyby jsou popsány dále.



Obr. 32 Geometrické chyby lineární osy X [18]

2.4.1.1 Měření přesnosti polohování

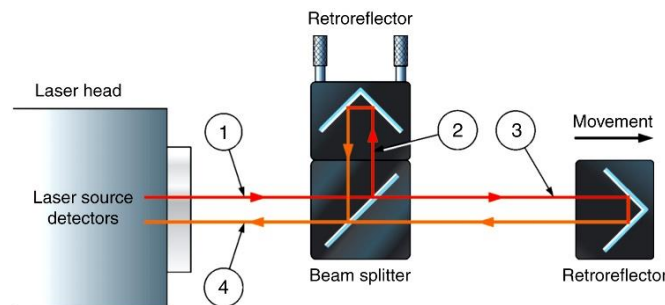
Modernější metoda měření výše zmíněných chyb je pomocí laserového interferometru. Princip světelné interference jako měřicího nástroje se datuje do roku 1880, kdy Albert Michelson vyvinul interferometrii. Michelsonův interferometr se skládá ze zdroje světla jedné vlnové délky (monochromatické světlo), zpola postříbřeného zrcadla a dvou dalších zrcadel. I když moderní interferometry jsou důmyslnější a měří s přesností v řádu 1ppm a vyšší, stále používají základní principy Michelsonova interferometru. Lineární měření (obr. 33) je nejběžnější forma měření provedená pomocí laser interferometru. Laserový systém měří přesnost a opakovatelnost lineárního polohování porovnáváním polohy zobrazené na stroji se skutečnou polohou měřenou laserovým systémem [2][3].



Obr. 33 Nastavení měřicího systému pro měření přesnosti polohování [Renishaw]

Paprsek (1), (obr. 34) vystupující z laseru má jednu frekvenci, která je velmi stabilní s nominální vlnovou délkou ($0,633\ \mu\text{m}$). Tento vstupuje do lineárního interferometru, kde je rozdělen na dva paprsky. Jeden paprsek (referenční (2)) směřuje k reflektoru připojenému k rozdělovači paprsků, zatímco druhý paprsek (měřicí (3)) prochází děličem paprsků na lineární reflektor. Oba paprsky se pak odrážejí zpátky do rozdělovače, kde jsou znovu spojeny a nasměrovány zpět na laserovou hlavu, kde detektor sleduje interferenci mezi těmito dvěma paprsky.

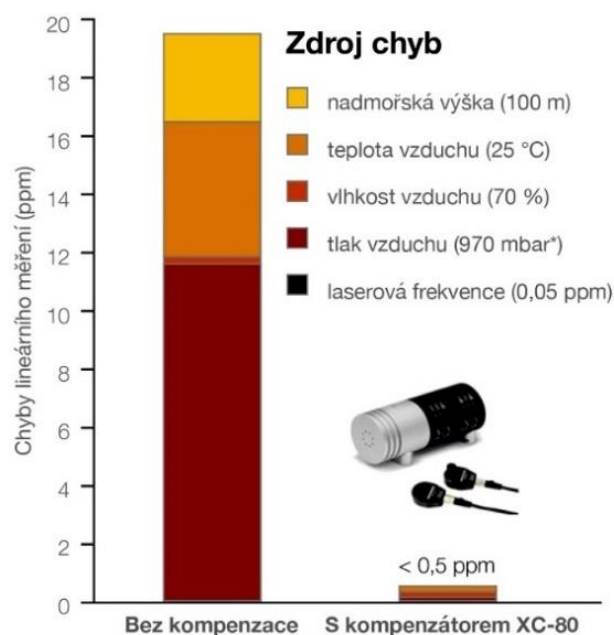
Během lineárních měření zůstává jedna z optických součástí stacionární, zatímco druhá se pohybuje podél lineární osy. Měření polohy se provádí sledováním změny rozdílu dráhy mezi měřicím a referenčním paprskem (je třeba si uvědomit, že jde o diferenciální měření mezi dvěma optickými součástmi a je nezávislé na poloze laseru). Toto měření lze porovnat s hodnotami stroje, aby se zjistily chyby v přesnosti polohování. Obvykle je lineární reflektor nastaven jako pohyblivá optická součást a interferometr jako stacionární složka [2][3].



Obr. 34 Princip měření přesnosti polohování interferometrem [Renishaw]

Vlnová délka laserového paprsku závisí na indexu lomu vzduchu, kterým prochází. Vzhledem k tomu, že se index lomu vzduchu mění s teplotou, tlakem a relativní vlhkostí, musí být hodnota vlnových délek použitá pro výpočet naměřených hodnot kompenzována změnami v těchto environmentálních parametrech.

V praxi pro měření přesnosti je taková kompenzace požadována pouze pro měření lineárního pohybu (přesnost polohy). Pokud není změna vlnové délky kompenzována (obr. 35), pak chyby měření mohou dosáhnout 50 ppm. Dokonce i v místnosti s kontrolovanou teplotou může změna v atmosférickém tlaku způsobit změny vlnové délky více než 20 ppm. Tyto chyby lze snížit pomocí kompenzátoru prostředí. Kompenzační jednotka měří teplotu vzduchu, tlak i vlhkost a poté vypočítá index lomu vzduchu (a tudíž i vlnovou délku laseru) pomocí Edlenovy rovnice. Laser se pak automaticky nastaví tak, aby kompenzoval jakékoliv změny ve vlnové délce. Výhoda tohoto systému je, že není vyžadován zásah uživatele a že kompenzace je často aktualizována. Není-li kompenzace provedena, mohou změny indexu lomu vzduchu vést ke značným chybám měření [2][3].



Obr. 35 Výhody kompenzace prostředí [Renishaw]

Při měření přesnosti polohování pomocí interferometru je třeba dbát na správné ustavení optik a laserové hlavy. V případě chybného nastavení vzniká Abbého a Cosinova chyba. Pokud se provádí měření s paprskem vyrovnaným rovnoběžně s osou kalibrace (pohybu), ale posunuté o offset, mohou úhlové chyby stroje (pitch, yaw) zavést Abbého chybu. Aby se minimalizoval vliv Abbého chyby, laserový měřicí paprsek by měl být shodný (nebo co nejbližší) s osou, po které je požadována kalibrace. Pro každou arc sec úhlového pohybu je zavedená chyba přibližně 0,005 $\mu\text{m}/\text{mm}$ offsetu.

Pokud je úhel konstantní, tak Abbého chyba nevzniká, neboť pohyblivá optika vede "bod otáčení" o konstantní vzdálenost. Jakékoliv odchylky dráhy laserového paprsku vzhledem k ose pohybu způsobí chybu mezi naměřenou vzdáleností a skutečnou ujetou vzdáleností. Tato se obvykle označuje jako Cosinova chyba. Velikost této chyby se vztahuje k úhlu nesouososti mezi laserovým paprskem a osou dráhy. Když je laser špatně vyrovnaný s osou pohybu, Cosinova chyba způsobí, že naměřená vzdálenost bude kratší než skutečná vzdálenost. Chyba se významně zvyšuje, jak se zvyšuje úhlový posun [2][3].

Parametry zařízení pro měření přesnosti polohování jsou popsány v následující tabulce.

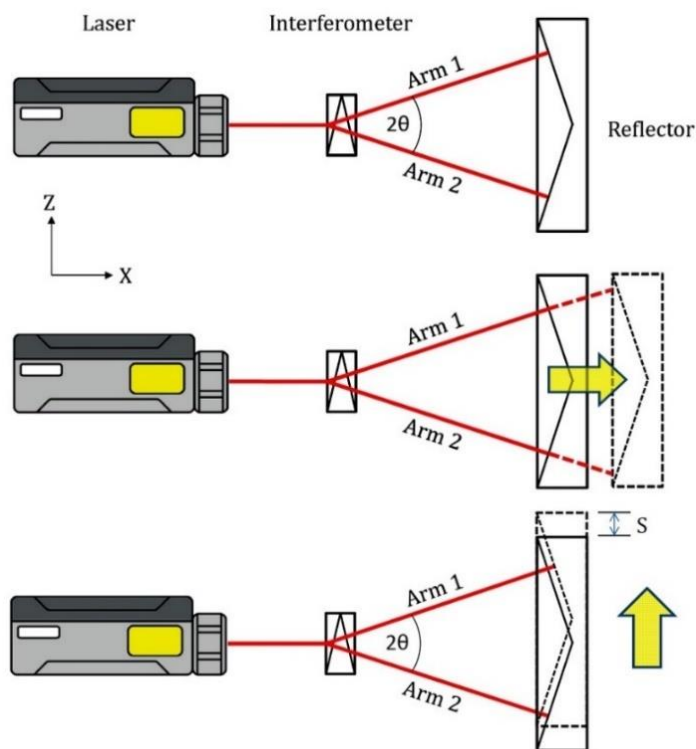
Tab. 1: Parametry zařízení XL – 80 pro měření přesnosti polohování

Parametr	Jednotka
Rozsah měření	0 – 80 m
Přesnost (nejistota) měření, s kompenzátořem, k=2	$\pm 0,5 \mu\text{m}/\text{m}$
Rozlišení	$0,001 \mu\text{m}$
Maximální rychlost snímaného pohybu	4 m/s

2.4.1.2 Měření přímosti a úhlových chyb (pitch/yaw)

Měření přímosti zobrazuje ohyb (ohnutý komponent) nebo nesouosost ve vedeních stroje. To může být způsobeno jejich opotřebením, nehodou, která je mohla poškodit, nebo špatnými základy stroje, které způsobí, že osa nebo celý stroj klesne. Zkoušky přímosti se provádí především u vodících ploch, lineárního vedení, pohybu suportu soustruhu nebo portálu po ložích a to především libelami, autokolimátory nebo laserovými interferometry. Měření přímosti pomocí interferometru jsou založené buď na měření vzdálenosti, nebo na měření úhlu. Pro měření vzdálenosti se používá Wollastonův hranol (interferometr) a odražeč (reflektor). Odchozí paprsek z laserové hlavy prochází interferometrem (Wollastonem), kde je rozdělen na dva samostatné paprsky rozkládající se v úhlu 2θ .

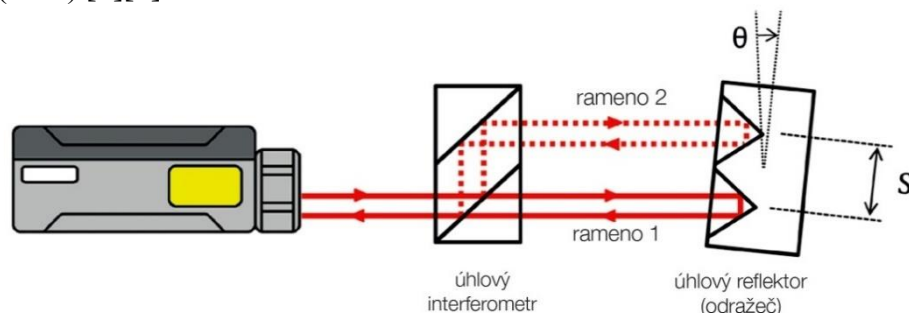
Tyto dva paprsky směřují do reflektoru, kde se odrážejí zpět a v interferometru se paprsky sbíhají a vrací se do vstupního portu v laserové hlavě. Když se reflektor pohybuje od interferometru podél dokonalé přímky ve směru měřené osy X, potom se paprsky ramen 1 a 2 změní o stejnou hodnotu, a přímost se nezmění. Pokud se však reflektor pohne ve směru osy Z o vzdálenost S (obr. 36), laserový paprsek v rameni 1 se prodlouží a paprsek v rameni 2 se zmenší. Software poté převede relativní změnu délky dráhy detekovanou laserem do přímosti, aby poskytl hodnoty S. Na stejném obrázku je znázorněno měření chyby přímosti EZX. Alternativně je možné měřit i horizontální odchylku přímosti (EYX) otočením interferometru a reflektoru o 90° [2][3].



Obr. 36 Princip měření přímosti [Renishaw]

Metoda založená na měření úhlů používá úhlové optiky. Pokud paprsek vystupující z laseru dosáhne úhlového interferometru, tak se rozdělí na dva paprsky. Jedna část pokračuje rovně na spodní část reflektoru a vytvoří rameno A1 (obr. 37) zatímco druhá část se pomocí rozdělovače odrazí směrem nahoru a poté je odražena na horní část reflektoru tak, že vytvoří rameno A2.

Oba paprsky se odrazí zpět do interferometru, kde se sbíhají a putují do detekční jednotky v laserové hlavě. Laserový systém měří změny úhlu díky změnám mezi délkami optických drah v paprscích A1 a A2. (ΔL). Tato změna délky dráhy je detekována uvnitř laserové detekční jednotky. Pro vyhodnocení přímosti se výsledek v SW přepočte na hodnotu přímosti. I zde otočením optik o 90° lze měřit druhou přímost. Při měření chyb přímosti není kompenzace prostředí nutná, protože oba měřicí paprsky jsou stejně ovlivněny změnami prostředí. Pokud by SW nepřepočítával úhly na chybu přímosti, tak se tímto způsobem měří úhlová chyba klopení (Pitch) a otočením optik o 90° chyba natáčení (Yaw) [2][3].



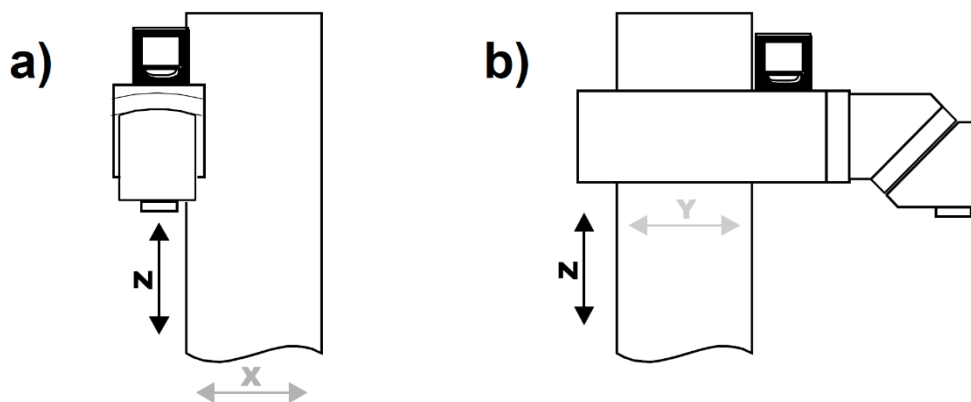
Obr. 37 Měření přímosti úhlovými optikami [Renishaw]

Parametry měření přímosti a úhlových chyb je v následující tabulce.

Tab. 2: Parametry zařízení XL – 80 pro měření přímosti a úhlových chyb

Parametr	Jednotka
Měření přímosti	
Rozsah měření: krátký rozsah	0,1 – 4 m
dlouhý rozsah	1 – 30 m
Rozsah měření přímosti	$\pm 2,5$ mm
Přesnost (nejistota) měření, $k=2$, krátký rozsah	$\pm 0,5\% \pm 0,5 \pm 0,15 M^2 \mu\text{m}$
dlouhý rozsah	$\pm 2,5\% \pm 5 \pm 0,015 M^2 \mu\text{m}$
Rozlišení: krátký rozsah	0,01 μm
dlouhý rozsah	0,1 μm
Měření úhlových chyb	
Rozsah	0 – 15 m
Rozsah úhlového měření	± 175 mm/m ($\pm 10^\circ$)
Přesnost (nejistota) měření, $k=2$	$\pm 0,2\%* \pm 0,5 \pm 0,1 M \mu\text{m/m}$
Rozlišení	0,1 $\mu\text{m/m}$ (0,01 úhlové vteřiny)
M – měřená vzdálenost v metrech	
% - procento ze zobrazené hodnoty (přímost), z vypočteného úhlu (úhel)	

Další používané zařízení pro měření přímosti a úhlových chyb jsou libely, které jsou relativně adekvátní náhradou za laserový interferometr. Na obr. 38 je znázorněno měření přímocarosti lineárního pohybu vřeteníku. Měření v části a probíhá v rovině ZX (chyba EXZ) a v části b se měří v rovině YZ (chyba EYZ). Měření probíhá po krocích, kdy se zapíše změřená hodnota a i zde je nutný přepočet na chybu přímosti. Stejným způsobem lze měřit i dvě úhlové chyby a to EBZ a EAZ.

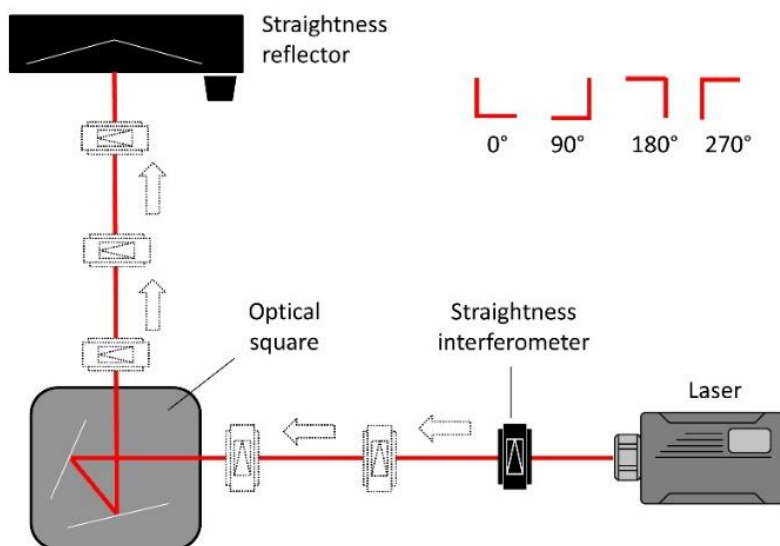


Obr. 38 Měření přímočarosti lineárního pohybu vřeteníku [Fermat CZ]

2.4.1.3 Měření kolmosti

Při měření kolmosti se porovnávají přímosti dvou na sebe kolmých os. Chyby kolmosti mohou být důsledkem opotřebení vedení, nehodou, která mohla způsobit poškození, nebo špatného základu stroje. Chyba kolmosti bude mít přímý vliv na přesnost polohování a konturovací schopnost stroje. Měření může probíhat na dvou horizontálních osách (kdy pozice laseru může být jedna nebo dvě) nebo jedné horizontální a jedné vertikální.

U této varianty je zapotřebí kromě optiky pro měření přímosti a optiky pro měření kolmosti také použít retroreflektor pro měření přímosti vertikálních os. Měření kolmosti se provádí tak, že se provede měření přímosti podél každé osy za pomoci společné reference. Společná reference je v tomto případě přímočarostní reflektor, který se mezi dvěma měřeními nesmí změnit. Optika pro měření kolmosti se používá pro měření druhé osy bez toho, aniž by se manipulovalo s přímostí optikou [2][3].

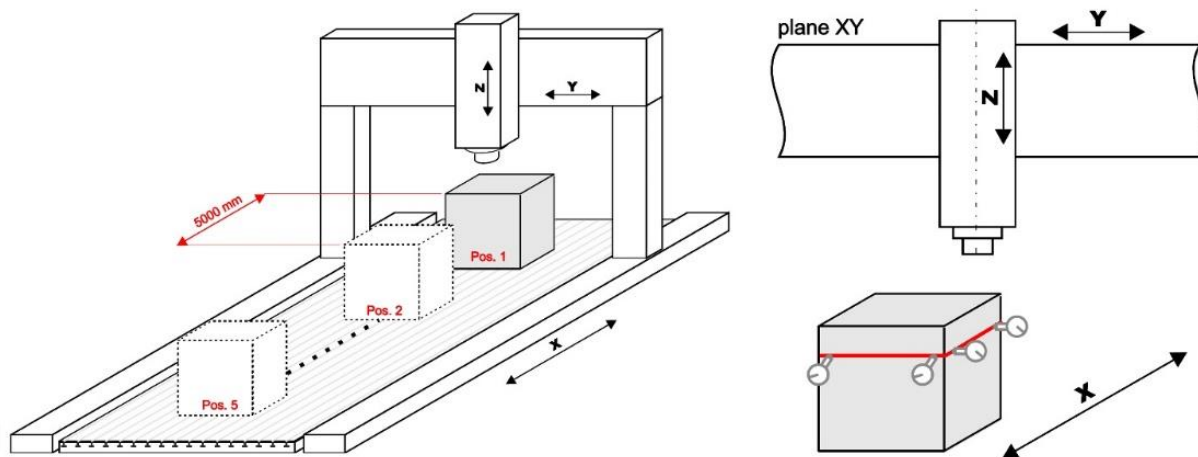


Obr. 39 Princip měření kolmosti horizontálních os s jednou pozicí laseru [Renishaw]

Tab. 3: Parametry zařízení XL – 80 pro měření kolmosti

Parametr	Jednotka
Rozsah měření	$\pm 3/M$ mm/m
Přesnost (nejistota) měření krátký rozsah dlouhý rozsah	$\pm 0,5\% \pm 2,5 \pm 0,8M$ $\mu\text{m/m}$ $\pm 0,5\% \pm 2,5 \pm 0,08M$ $\mu\text{m/m}$
Rozlišení	0,01 $\mu\text{m/m}$
M – měřené vzdálenost na delší z měřených os v metrech % – procento ze zobrazené hodnoty	

Pokud není k dispozici laserový interferometr s optikami pro měření kolmosti, musí se měření provést pomocí různých přípravků a zařízení s různými uspořádáními. Mezi přípravky můžeme zařadit měřicí hranoly, trny nebo granitové krychle a mezi zařízení především úchylkoměry. Na obr. 40 je naznačeno měření kolmosti portálového obráběcího centra pomocí granitové krychle a úchylkoměru. Granitová krychle je postupně přesouvána o určitou vzdálenost, v tomto případě o 5000 mm. V místě umístění krychle jsou postupně změřeny všechny tři roviny XY, YZ a ZX. Na obrázku je naznačeno měření roviny XY [2].

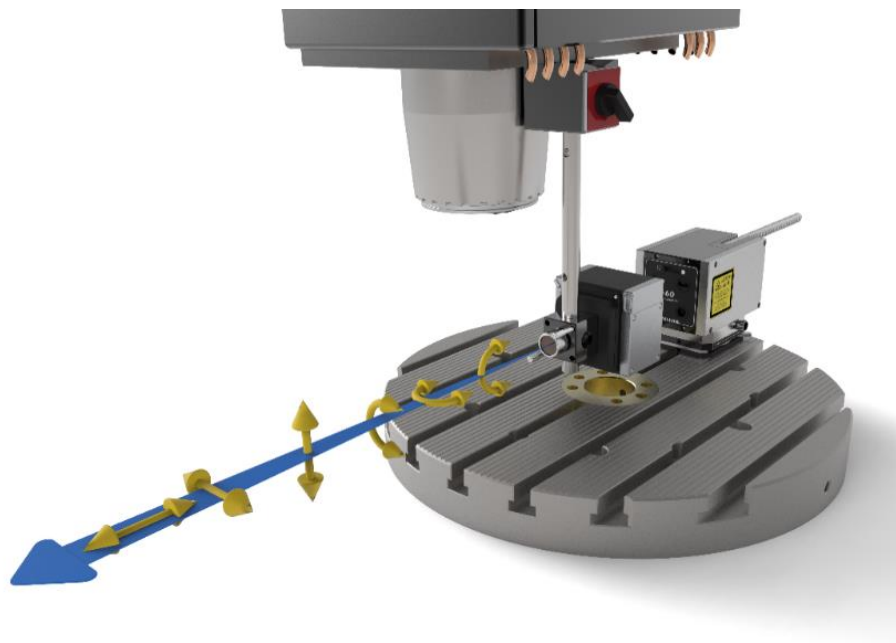


Obr. 40 Měření kolmosti portálového obráběcího centra [Fermat CZ]

2.4.1.4 Měření víceosým kalibrátorem

Při měření interferometrem je pro každou geometrickou chybu nutno použít a přestavit vždy jiné optiky. Proto byly vyvinuty víceosé kalibrátory (obr. 41), které jsou navrženy pro přímé měření geometrických chyb stroje při jediném nastavení. Měření není ovlivněno složitými matematickými výpočty a souvisejícími nepřesnostmi obvyklými u některých alternativních měřících technik. Díky přímému měření je porovnání stavu stroje před a po seřízení rychlé a snadné. Snímáním všech tří lineárních a tří rotačních chyb v průběhu jediného měření lze odhalit zdroje chyb namísto pouhého zjištění jejich důsledků, což je častý případ při provádění izolovaného lineárního měření. Kalibrátory představují výkonné diagnostické řešení pro kontrolu všech stupňů volnosti při jediném nastavení diagnostického systému. Kompaktní laserová jednotka je umístěna odděleně od laserového zdroje, což snižuje vliv tepelných účinků na výsledky měření. Jednotka může být upevněna na stroji v poloze naboku, vzhůru nohama a také postavena na zadní stranu. Variabilita upevnění je obzvláště výhodná při použití v místech s obtížným přístupem [2][3].

Bezdrátový přijímač napájený z akumulátorů odstraňuje problémy s přívodními kabely při pohybech stroje, které mohou porušit seřízení systému nebo způsobit přerušení laserového paprsku během měření [2][3].



Obr. 41 Víceosý kalibrátor XM 60 [Renishaw]

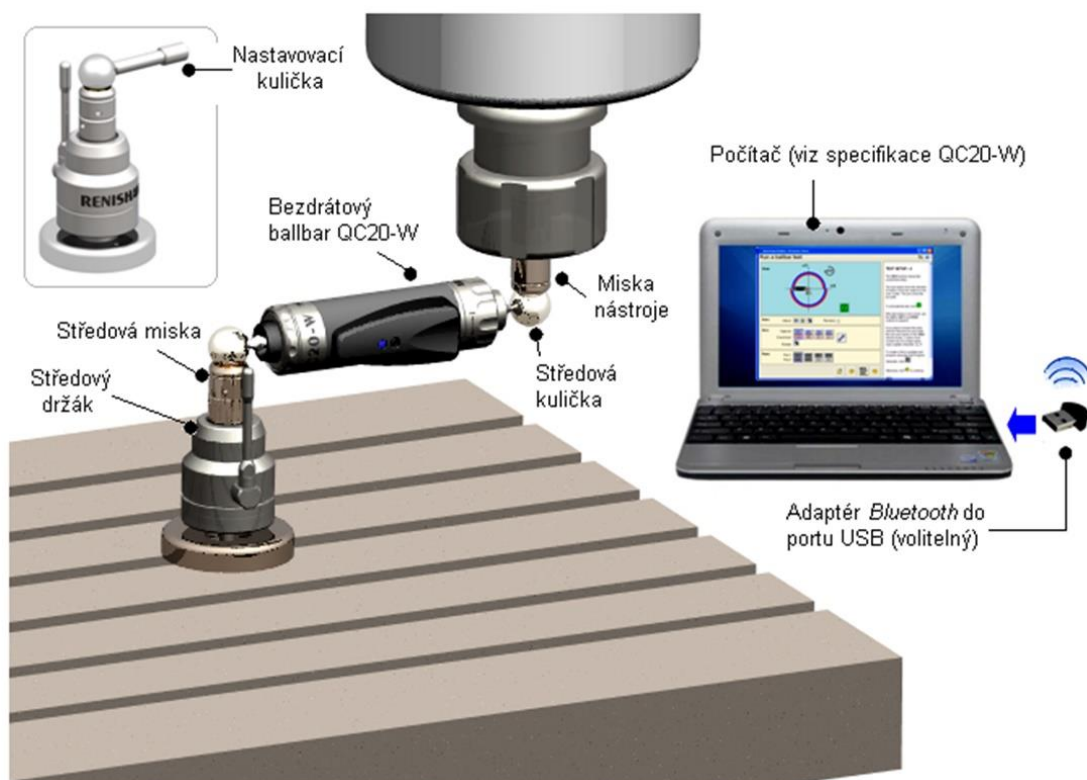
Tab. 4: Parametry zařízení XM – 60 pro měření šesti geometrických chyb

Parametr	Jednotka
Lineární měření	
Rozsah měření	0 – 4 m
Přesnost (nejistota) měřen, s kompenátorem	$\pm 0,5 \text{ ppm}$
Rozlišení	$0,1 \text{ } \mu\text{m}$
Úhlové měření (pitch/yaw)	
Rozsah měření	$\pm 500 \text{ } \mu\text{rad}$
Přesnost (nejistota) měření	$\pm 0,006A \pm (0,5 \text{ } \mu\text{rad} + 0,1M \text{ } \mu\text{rad})$
Rozlišení	$0,03 \text{ } \mu\text{rad}$
Úhlové měření (roll)	
Rozsah měření	$\pm 500 \text{ } \mu\text{rad}$
Přesnost (nejistota) měření	$\pm 0,01A \pm 9,1 \text{ } \mu\text{rad}$
Rozlišení	$0,5 \text{ } \mu\text{rad}$
M – měřené vzdálenost v metrech A – zobrazená hodnota úhlové chyby	
Měření přímosti	
Rozsah měření	$250 \text{ } \mu\text{m}$ radius
Přesnost (nejistota) měření	$\pm 0,01A \pm 2 \text{ } \mu\text{m}$
Rozlišení	$0,25 \text{ } \mu\text{m}$
A – zobrazená hodnota přímosti	

2.4.1.5 Měření přesnosti kruhové interpolace

K měření kruhové interpolace se nejčastěji používá Double Ballbar (obr. 42), který představuje rychlý, snadný a efektivní způsob sledování stavu obráběcího stroje. Středem celého systému je samotný ballbar, velmi přesný lineární snímač a dvojice koulí na obou koncích. Při používání, se koule kinematicky umístí mezi přesné magnetické držáky, z nichž jeden je připevněn ke stolu stroje a druhý k vřetenu stroje nebo plášti vřetene. Díky tomuto uspořádání je ballbar schopen měřit i drobné změny poloměru naprogramované kruhové dráhy. Nasnímaná data se použijí k výpočtu celkové hodnoty přesnosti (kruhovitost, odchylka kruhovitosti) v souladu s mezinárodními normami.

Pomocí unikátních matematických algoritmů lze zjistit hodnoty až 15 konkrétních polohovacích chyb stroje jako je kolmost, chyba odměřování, backlash, zpoždění serva, atd. Jednotlivé chyby jsou uspořádány podle významu z hlediska celkové přesnosti stroje společně s hodnotou chyby. Kruhová dráha vytvořená pohybem dvou lineárních číslíkově řízených os je ovlivněna geometrickými odchylkami těchto pohybů a odchylkami způsobenými číslíkovým řízením a jeho pohony [2][3].



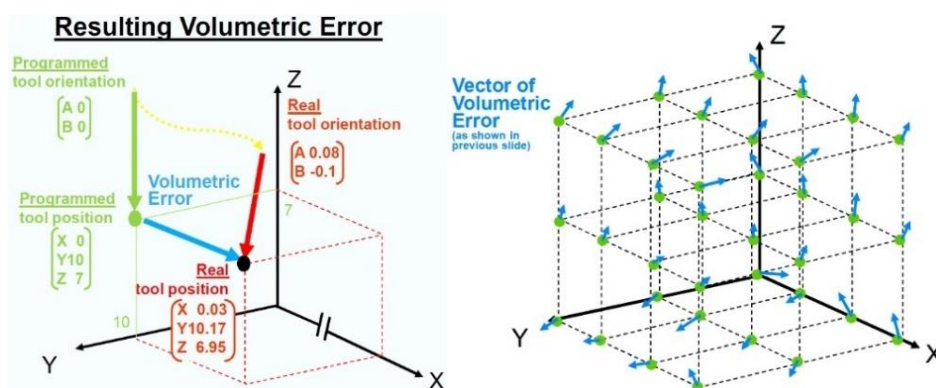
Obr. 42 Systém Ballbar QC20 – W [Renishaw]

Tab. 5: Parametry zařízení DBB QC20 – W pro měření přesnosti kruhové interpolace

Parametr	Jednotka
Rozsah měření	$\pm 1 \text{ mm}$
Přesnost snímače ballbaru (při 20°C)	$\pm 0,5 \text{ }\mu\text{m}$
Přesnost měření systému (při 20°C)	$\pm 1,25 \text{ }\mu\text{m}$
Rozlišení	$0,1 \text{ }\mu\text{m}$

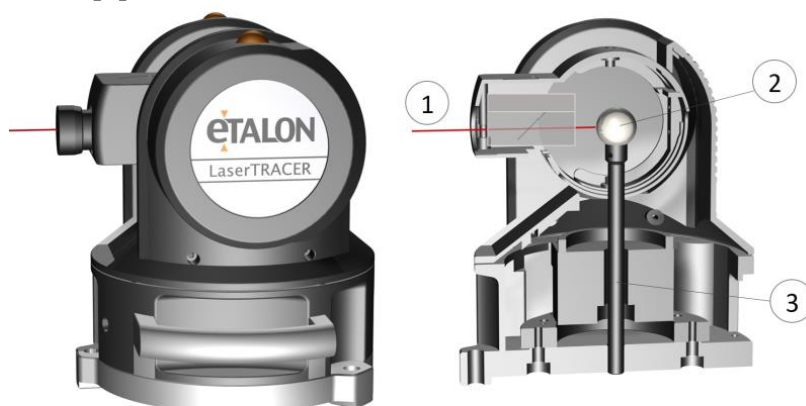
2.4.1.6 Měření volumetrické přesnosti

Měření a případná kompenzace volumetrické přesnosti je náročný proces, který vyžaduje vysoce kvalifikovanou obsluhu. Při pohybu lineárními osami vznikají chyby v pohybu a poloze. Proto se zavádí měření volumetrické přesnosti, které se provádí pro minimalizování prostorové (volumetrické) chyby popsané v jakémkoliv bodu v prostoru. Pokud strojem pohybujeme do naprogramované pozice (obr. 43), tak vzhledem k chybám, které se na stroji vyskytují, bude špička nástroje (TCP) o tyto chyby vychýlená ze své naprogramované pozice. Lze tedy říct, že volumetrická chyba je definována jako odchylka polohy a orientace TCP od ideální (naprogramované) polohy. Z provedeného měření jsou získána data a dopočítány vektory volumetrické chyby pro každý z definovaného bodu v pracovním prostoru (pravá část obr. 43).



Obr. 43 Volumetrická chyba se znázorněním vektorů v prostoru [Siemens]

Pro měření se používá zařízení LaserTRACER (LTc, obr. 44), které se skládá z vlastní laserové hlavy, řídicí jednotky, elektronické jednotky, odražečů a snímače teploty, tlaku a vlhkosti. LTc je samonaváděcí interferometrické zařízení, které slouží pro měření délky. Uvnitř zařízení se nachází přesný prostorový odražeč s tvarovou odchylkou menší než 50 nm, který slouží jako referenční zrcadlo a je mechanicky a tepelně oddělený od sledovacího mechanismu, čímž zůstává stabilní při pohybu sledovacího mechanismu. Tímto způsobem jsou zcela eliminovány chyby vedení v osách otáčení a naklápění a je zaručena stabilita středu otáčení lepší než 0,3 μm . Interferometr má rozlišení 1 nm a je vybaven vestavěnými snímači teploty, vlhkosti a tlaku, aby do značné míry kompenzoval vlivy podmínek prostředí [2].

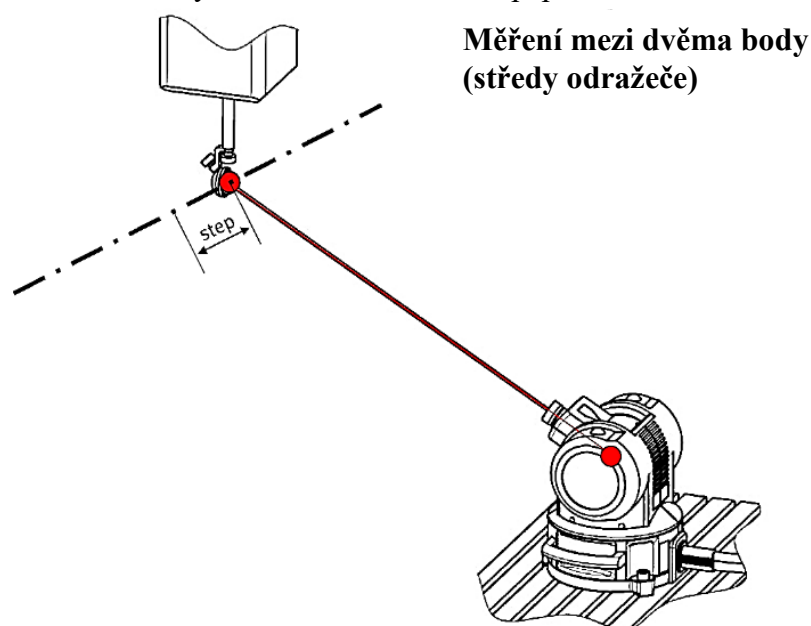


- (1) Měřicí paprsek s nanometrovým rozlišením
- (2) Referenční koule s chybou < 50 nm
- (3) Nízký součinitel teplotní roztažnosti materiálu

Obr. 44 Měřicí zařízení LTc druhé generace [Etalon]

Laserové světlo je dodáváno skleněným vláknem, které umožňuje velmi nízké tepelné zatížení měřicího přístroje a současně umožňuje velmi kompaktní tvar. Princip měření je založen na sekvenční – multilateraci. Pokud měřím objekt ze čtyř definovaných pozic, může být jeho poloha v prostoru jednoznačně určena pomocí délky, v tomto případě laserového paprsku. Zařízení je také jedinečné v tom, že jeho nejistota měření je $0,2 \mu\text{m} + 0,3 \mu\text{m/m}$. Zjednodušeně řečeno to znamená, že osa délky 5 m bude mít nejistotu měření $1,7 \mu\text{m}$.

Paprsek vyslaný z LTc (obr. 45) putuje do odražeče, který je upnut do držáku nástrojů a je odražen zpět. Stroj pohybuje odražečem po předdefinované dráze a vždy ho zastaví v určitém bodu v prostoru na takovou dobu, aby zařízení změřilo délku paprsku [2].



Obr. 45 Princip měření zařízením LTc [Etalon]

Po změření všech definovaných pozic laseru provede SW kalkulace pomocí metody Monte Carlo a zobrazí vektorovou mapou chybových odchylek v pracovním prostoru. I při tomto měření je důležitá stálost teplotního prostředí, protože s rostoucí dobou měření se mění teplota a klesá opakovatelnost stroje. Dalším faktorem ovlivňující měření jsou vibrace stroje. Pokud v důsledku těchto nedojde k ustálení paprsku tak dojde k přerušení měření aktuální polohy a měření musí být opakováno. [2]

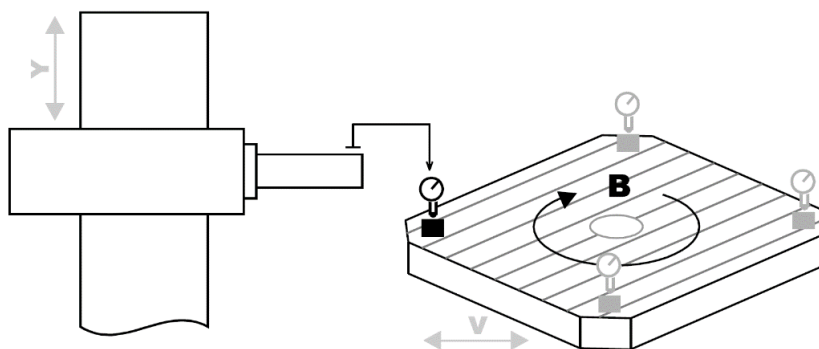
Tab. 6: Parametry zařízení Laser TRACER pro měření volumetrické přesnosti

Parametr	Jednotka
Rozsah měření	0,2 – 20 m
Rozsah elevace	-35° – 85°
Rozsah otáčení	±225°
Rozlišení interferometru	0,001 μm
Stabilita referenční koule	±0,1 μm
Přesnost (nejistota) měření	$0,2 \mu\text{m} + 0,3 \mu\text{m/m}$

2.4.2 Měření přesnosti rotačních os obráběcích center

2.4.2.1 Geometrická přesnost

Měření geometrické přesnosti rotačních os za pomoci standardního vybavení montáže (úchylkoměry, trny, granitová pravítka, libely) je prakticky nemožné. S těmito zařízeními lze změřit např. čelní házivost upínací plochy při otáčení (obr. 46), obvodová házivost středícího kroužku stolu, rovinnost stolu atd. Proto se pro změření geometrických chyb používají různé vybavení a to především obrobkové sondy, kapacitní snímače nebo tracery.



Obr. 46 Čelní házivost upínací plochy stolu při otáčení [Fermat CZ]

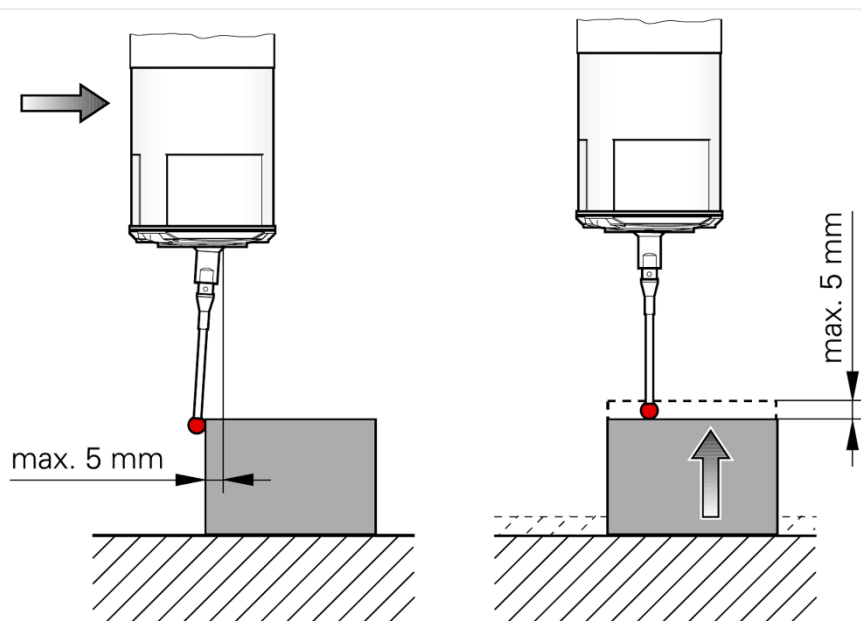
2.4.2.2 Měření geometrické přesnosti sondami

Většina výrobních firem investovala do svých strojů ve formě koupi sond, ať už obrobkových nebo nástrojových. Hlavním přínosem tohoto rozhodnutí je snížení neproduktivních časů, jako je seřízení a vyrovnaní dílce v pracovním prostoru nebo samotné měření dílce na stroji (mezioperační měření) aniž by se musel obrobek sundávat a převážet na externí 3D měřicí zařízení nebo kontrola břitu nástroje před započítím operace třískového obrábění. Toho využili výrobci obráběcích strojů (i výrobci a dodavatelé sond) k vyvinutí měřicího cyklu pro měření chyb rotačních os. I když si firmy své kalibrační cykly pojmenovali jinak, ve své podstatě toho, co jsou schopny měřit a kompenzovat jsou stejné. Některé názvy od různých výrobců jsou popsány níže:

- Heidenhain – KinematicsOpt (opce 48);
- Siemens – Cyklus 996;
- DMG Mori – 3D quickSet;
- Okuma – 5-axis Auto Tuning System;
- Mitsui Seiky – AMCS (Automatic Measurement Correction System);
- Renishaw – AxiSet™ Check-Up;
- GROB – GSC (Grob Swiel axis Calibration).

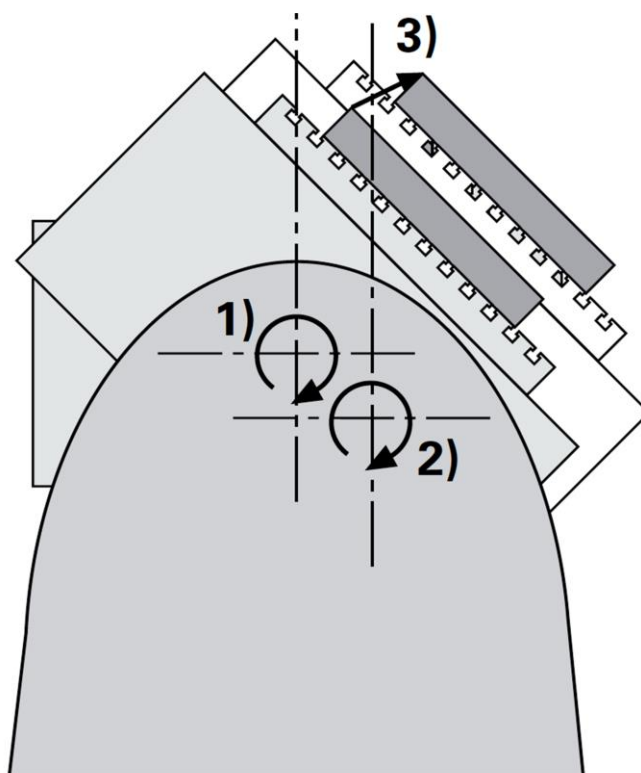
K měření se používá kalibrační artefakt, který má na svém konci přesně obrobenou kouli a obrobková sonda. Ta slouží jako koncový spínač, který při kolizi sondy s měřeným prvkem generuje spínací signál. Spínací signál se prostřednictvím komunikační jednotky odesílá do řídicího systému stroje, kde je z odměřovacích pravítek stroje odečtena poloha sejmutého bodu. Sond je nepřeberné množství, které si můžeme rozdělit např. dle spínacího signálu (opticky, tenzometr) nebo dle přenosu signálu (infračerveně, rádiově, kabelem). Snímání se děje mechanickým dotykem kuličky na konci obrobkové sondy. Z toho důvodu musí být měřený povrch co nejčistší.

Velmi důležitým parametrem pro přesnost měření je rychlost nájezdu sondy a maximální vychýlení hrotu (z důvodu poškození sondy). V rámci této dráhy se musí zastavit pohyb stroje (obr. 47). Doby zpracování signálů CNC systémem ovlivňují reprodukovatelnost snímání dotykové sondy. Pro maximální nájezdovou rychlost je potřeba vzít v úvahu kromě doby zpracování signálu také přípustné vychýlení dotykového hrotu. Přesnost snímání je definována jako odchylka, která je stanovena po sejmutí zkušebního vzorku z různých směrů při teplotě okolí 20 °C. Přesnost snímání zohledňuje efektivní poloměr kuličky, což je skutečný poloměr kuličky a vychýlení dotykového hrotu potřebného k vygenerování spínacího signálu. Firma Heidenhain pro svou sondu označenou TS 460 (přenos signálu rádiově nebo infračerveně) udává přesnost snímání $\pm 5 \mu\text{m}$. Reprodukovatelnost snímání při najíždění z jednoho směru při definované orientaci vřetene a při rychlosti snímání 1 m/min udávají 1 μm . Pro rychlost snímání 3m/min resp. 5 m/min je opakovatelnost 1 μm resp 4 μm [3][19].



Obr. 47 Vychýlení dotykového hrotu [Heidenhain]

Máme – li stroj s kinematikou rotačních os jak je naznačeno na obr. 48, tak existuje vždy rozdíl mezi polohou rotační osy v kinematickém modelu stroje v řídicím systému (1) a skutečnou pozicí rotační osy (2). Tento rozdíl způsobí chybu polohy (3), která se projeví při naklopení rotační osy a způsobí nesprávné obrobení požadované součásti. Z těchto důvodů se používá uvedené měření a kompenzace změřených hodnot.



Obr. 48 Rozdíl mezi skutečnou pozicí rotační osy a polohou v kinematickém modelu stroje [Heidenhain]

Měření ať už KinematicsOpt (Heidenhain) nebo Cyklu 996 (Siemens) je udělán formou předdefinovaného cyklu, do kterého uživatel dle parametru zadává hodnoty. Zkušený operátor tyto parametry zná a ví, jak je vyplnit, proto je zde nebudeme všechny uvádět. Začíná se určením, zda chceme kinematiku pouze změřit či provést i následnou kompenzaci. Dále je třeba určit kterou osu, v případě kinematické dvojice, začít a rozsah měření, počet bodů atd. Po zapsání zbylých parametrů, které se týkají především pohybu stroje při přejezdu na další měřenou pozici (bezpečnostní odstup, rychlost nájezdu), přichází na řadu samotné měření.

Nejdříve je třeba umístit kalibrační artefakt do takové pozice, aby při pohybu nevznikla kolize a zároveň co nejdále od středu rotace měřené osy. Důležité je zmínit, že měření je ovlivněno geometrickými a polohovými chybami stroje. Čím jsou tyto chyby větší, tím bude rozptyl výsledku měření větší. Rozptyl výsledku měření je měřítkem statické přesnosti naklápění stroje, do které se započítává měřený rádius, počet a pozice měřených bodů. Proto je jeden měřený bod málo pro výpočet rozptylu.

Poté se hrubě přijede nad střed kuličky a spustí se cyklus. Sonda v první fázi nezná přesnou pozici středu kuličky, proto je první měření určeno k nalezení přesné pozice a to tak, že si sonda postupně ve všech směrech kuličku oťuká. Po zjištění středu cyklus automaticky upraví pozice pro nájezd na kuličku, tak aby sonda najížděla na tento střed a následuje kalibrační měření stejné pozice. V další fázi se rotační osa otočí dle námi zvolené strategie do další polohy. V této pozici sonda opět oťuká ve všech směrech kuličku. Vzhledem k tomu, že známe pozici středu kuličky z kalibračního měření, tak je pro cyklus jednoduché spočítat odchylky změřené sondou od skutečné pozice měřené kuličky. Tento postup se opakuje dle zvolené strategie.

Cyklus poté měření vyhodnotí a zapíše do protokolu. Pokud jsme zvolili i kompenzaci, tak cyklus automaticky upraví kinematiku rotační osy v řídicím systému stroje. Na obr. 49 je znázorněna kalibrace osy A v jedné ze své měřící pozici.

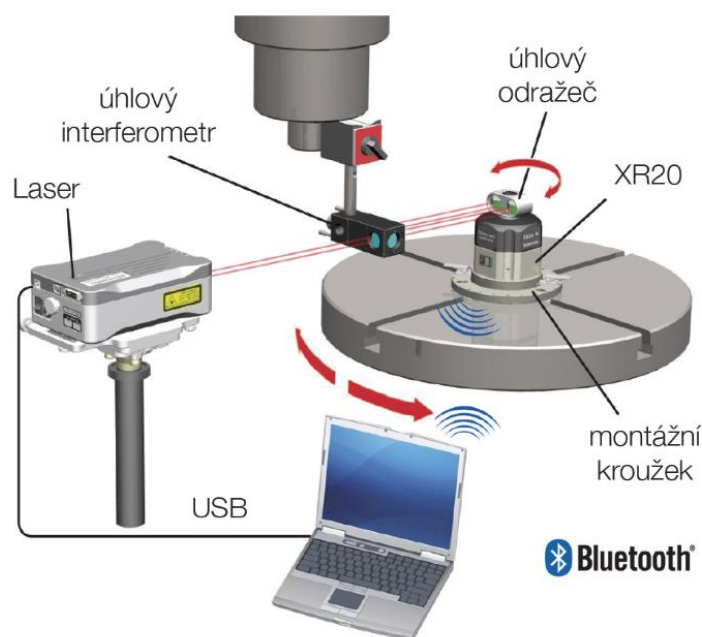


Obr. 49 Měření kinematiky cyklem KinematicsOpt [Heidenhain]

Měření nemusí být prováděno před každým obráběním, ale vzhledem k rychlosti nastavení a relativní jednoduchosti měření je dobré znát rozdíl mezi polohou rotační osy v kinematickém modelu stroje v řídicím systému a skutečnou pozicí rotační osy. Proto pokud měření bude prováděno častěji, tak je menší pravděpodobnost výroby neshodných dílů.

2.4.2.3 Přesnost polohování

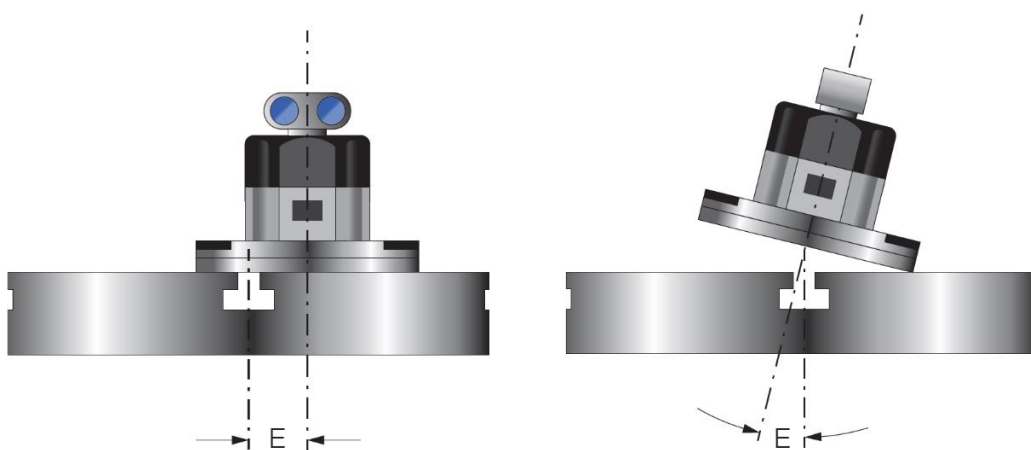
Rotační osy jsou na obráběcích strojích stále běžnější a jejich přesnost je mimořádně důležitá pro celkovou přesnost stroje. Systém pro kalibraci rotačních os (obr. 50) se používá společně s laserovým interferometrem, který poskytuje referenční měření. Systém využívá vysoce přesný proprietární optický kodér v kombinaci se servomotorem pro řízení pohybu a udržování cílových poloh. Klíčovou výhodou systému je jeho schopnost efektivně sledovat optický cíl, který umožňuje vyšší rychlosti rotace os mezi body snímání dat. Další důležitou předností systému je jeho flexibilní použití. Jeho modulární montážní systém umožňuje rychlé a snadné připevnění k nejrozličnějším typům rotačních os. Vycentrování na testované osy není kritickým aspektem díky integrované zaměřovací optice a rychlé, automatické kalibrační rutině zahrnuté v testovacím softwaru [2][3].



Obr. 50 Kalibrace rotačního stolu pomocí systému XR20 – W [Renishaw]

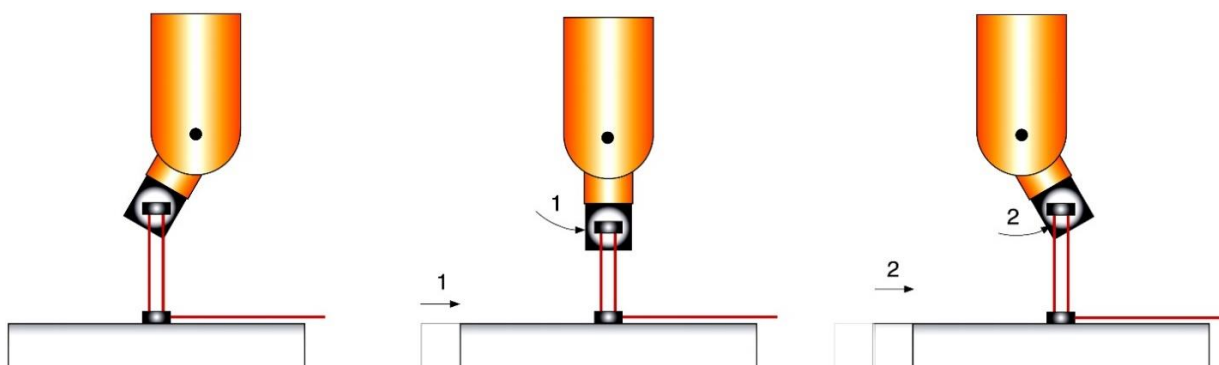
Paprsek vystupující z laseru prochází úhlovým interferometrem, který jej rozdělí na dva rovnoběžné paprsky. Odražeč odráží paprsky zpět do interferometru, který je sloučí. Rotační osa zastaví v řadě cílových poloh vždy po dostatečně dlouhou dobu na to, aby software automaticky změřil polohu osy a porovnáním s naprogramovanou polohou vypočítal úhlovou odchylku v těchto polohách. Laser tak měří úhlovou polohu úhlového odražeče. Tím se získá přesná poloha testovaného stolu. Během otáčení osy se zařízení otáčí v opačném směru, aby bylo zajištěno, že se laserový paprsek vrátí zpět do laseru a nedojde k jeho přerušení [2][3].

Jednou z výhod systému je, že software dokáže vykompenzovat drobné nepřesnosti ve vyrovnaní laseru, systému a testované osy. To znamená, že se systém při nastavování na testovanou osu nemusí dokonale vyrovnat. Software automaticky změří nepřesnost úhlového vyrovnaní pomocí kompenzační rutiny a vyřeší ji použitím kompenzačních činitelů na data získaná z laseru. V zájmu minimalizace chyb při měření by měl být paprsek laseru vyrovnán kolmo k rotační ose stroje. Aby vzniklá chyba byla menší než ± 1 úhlová vteřina, musí být $E < 0,025^\circ$ nebo TIR (celková excentricita) $< 0,04$ mm na poloměru 50 mm od středu otáčení testovaného stroje. A aby vzniklá chyba byla menší než ± 10 úhlových vteřin, musí být $E < 0,23^\circ$ nebo TIR $< 0,4$ mm na stejném poloměru otáčení (obr. 51). Další chyba, která při ustavování může nastat, je, že osy otáčení jsou rovnoběžné, ale ne totožné. Aby nedošlo k zeslabení signálu, musí být $E < 1$ mm. Důležité také je, aby byl laserový paprsek kolmý na odražeč. Tato chyba je změřena a odstraněna cyklem kalibrace optického nastavení [3].



Obr. 51 Chyba při vyrovnání XR20-W [Renishaw]

Kalibrace rotační osy standardně vyžaduje montáž zařízení na střed rotační osy stroje. To vede k potížím u strojů s omezeným přístupem ke středu otáčení a kalibrace osy pak vyžadovala složité upevňovací držáky a vyrovnávací postupy. S tímto problémem se často setkáváme u strojů s otočně-sklopným stolem nebo vidlicovou frézovací hlavou. Řešením je namontovat systém mimo osu (to znamená, že není namontovaný na střed otáčení) a při kontrole synchronizovat lineární a rotační pohyby (obr. 52). Je nutné, aby řídicí systém stroje věděl, jak daleko má posunout lineární osu pro každý rotační pohyb, aby tak mohl předejít přerušení laserového paprsku [2][3].



Obr. 52 Princip synchronizace rotační a lineární osy [Renishaw]

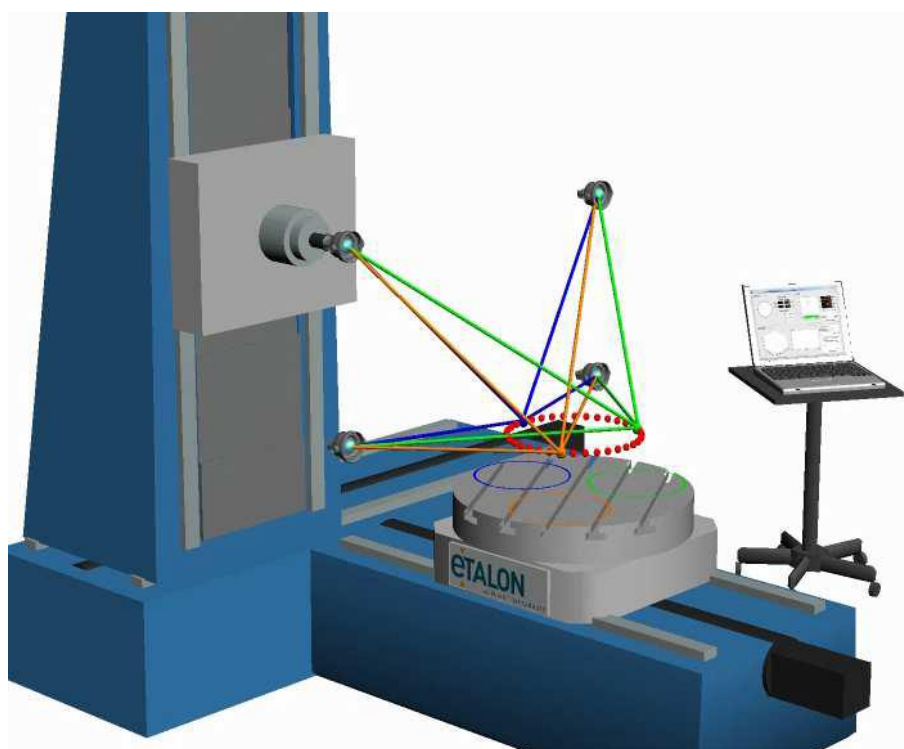
Tab. 7: Parametry zařízení XR20 – W pro měření přesnosti polohování rotačních os

Parametr	Jednotka
maximální rychlost otáčení (<5° uhel otáčení)	neomezeně
maximální rychlost otáčení (>5° uhel otáčení)	10 ot.min ⁻¹
Přesnost vycentrování	±1 mm
Rozsah měření	0° - 360°
Měření s XL - 80	
Přesnost (při 20°C)	±1''
Rozlišení	0,1''
Měření s víceosým kalibrátorem	
Přesnost (při 20°C)	±1,2''
Rozlišení	0,1''

2.4.2.4 Volumetrická přesnost

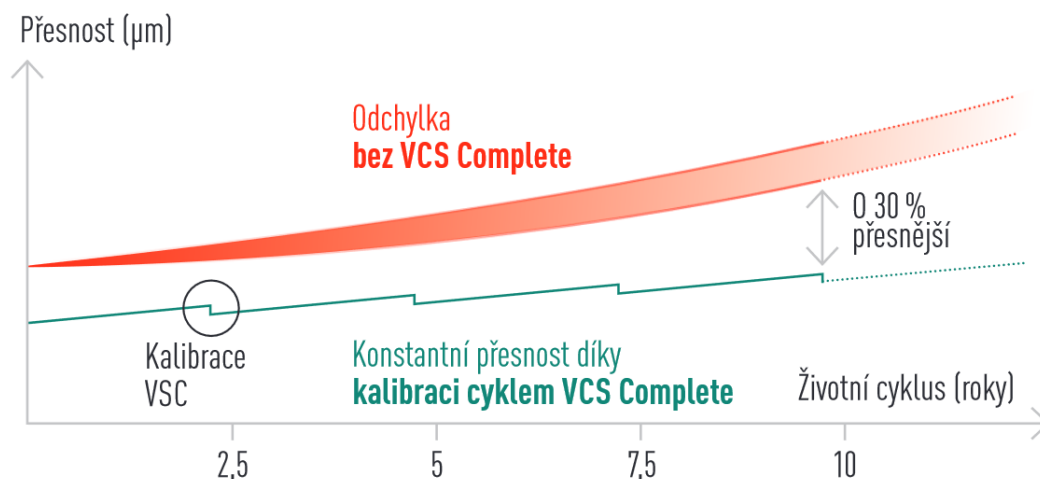
Měření volumetrické chyby rotační osy probíhá na stejném principu jako měření lineárních os (kap. 2.4.1.6), tedy na sekvenční – multilateraci kdy poloha v prostoru měřeného objektu může být jeho jednoznačně určena ze čtyř definovaných pozic pomocí délky laserového paprsku. K měření se používá vybavení shodné s měřením lineárních os. Kalibrace rotačních os se odvíjí od lineární os. Z tohoto důvodu je vyžadováno měření a kompenzace přesnosti lineárních os - odchylky ovlivňují výsledky rotační osy a to zejména chyby polohy.

Ve strategii měření se udávají informace o stroji (o lineárních i rotačních osách), odražeče a LTc. Po provedení strategie SW automaticky spočítá pozice LTc a lineárních os pro měření. Celkem jsou pro jednu pozici LTc na rotační ose čtyři pozice lineárních os. To znamená, že rotační osa musí provést dvanáct rotací. Měření osy C je znázorněno na obr. 53.



Obr. 53 Měření volumetrické chyby osy C [ETALON]

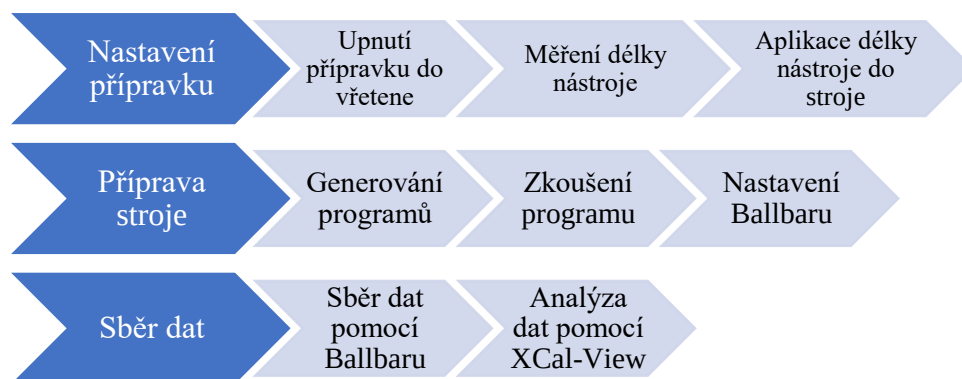
Měření volumetrické chyby není tak běžné jak by se na základě získaných informací z měření a možností kompenzace zdálo (nevýhodou je zde časová náročnost a nutnost kvalifikace obsluhy). Většina firem toto měření neaplikuje. V případě firmy DMG Mori je situace jiná. V nedávné době pro své zákazníky zavedla technologický cyklus pod názve VCS Complete. Měření se skládá z umístění speciální karbonové tyče a dvou kalibračních koulí na koncích. Sonda oťuká koule na zjištění referenční polohy. Rotační osa je otočena a sonda změří kalibrační koule. Tímto způsobem lze proměřit rotační kinematické dvojice a pomocí kompenzačních algoritmů automaticky zjistit prostorové odchylky. Firma udává, že měřením se geometrická přesnost zlepší až o 30 % (obr. 54).



Obr. 54 Zajištění přesnosti pomocí pravidelné kalibrace VCS Complete [DMG Mori]

2.4.2.5 Měření rotačních os dle normy ČSN ISO 10791-6

První zařízení, které se používá je Ballbar, který je ale primárně využíván pro měření přesnosti kruhové interpolace dvou lineárních os (kap. 2.4.1.5). Pro měření rotačních os se využívá testování nazvané Ballbar Trace, které bylo speciálně vyvinuté pro pětiosé obráběcí stroje. Testování probíhá dle normy ČSN ISO 10791-6. Testování vyžaduje pečlivější přípravu než u měření kruhové interpolace a obecný postup ukazuje obr. 55.

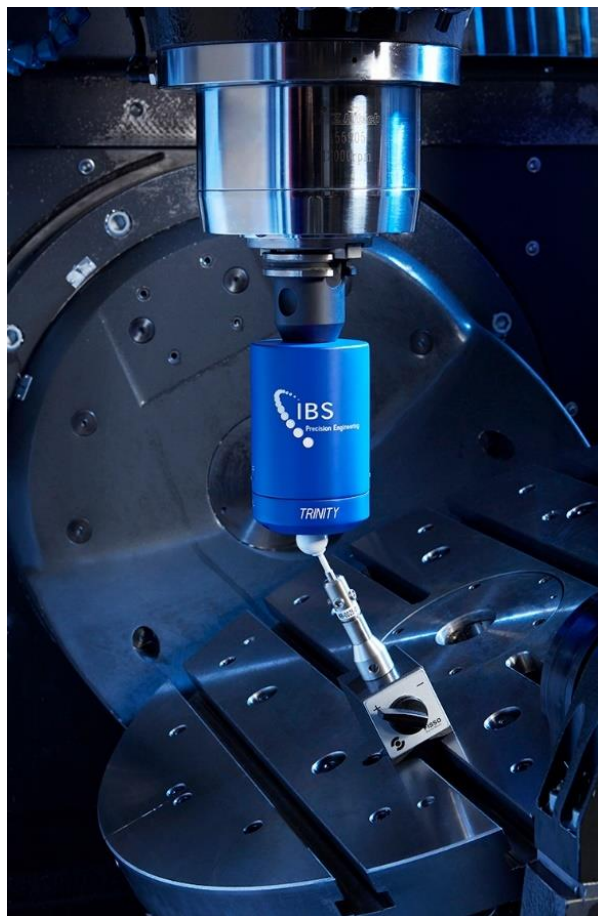


Obr. 55 Obecný postup měření Ballbar Trace [Renishaw]

Princip je do jisté míry totožný s měřením přesnosti kruhové interpolace především v tom, že i zde je ballbar umístěn mezi přesné magnetické držáky, z nichž jeden je připevněn ke stolu stroje a druhý k vřetenu stroje. Po spuštění programu stroj pohybuje s měřenou rotační osou a dvěma lineárními osami v závislosti na tom, která chyba je měřena.

Další zařízení, které měří a vyhodnocuje rotační osy dle výše zmíněné normy je Rotary analyzer. Zařízení vyhodnocuje chyby na základě naměřených dat ze tří po 120° ustavených kapacitních snímačů. Na základě nasazení kapacitních snímačů vychází i výsledná nejistota měření zařízení, jak pro statický, tak pro dynamický režim měření. Dynamický režim přitom znamená získání nových informací o stavu rotačních os. Podstatnou nevýhodou jsou pořizovací náklady takového zařízení a tím i vysoká cena samotného měření.

Hardware zařízení Rotary analyzer a ukázka na otočném stole je znázorněna na obr. 56. Měřicí zařízení se skládá z potřebného hardware a software. Hardware se skládá z měřicí hlavy, která se zpravidla upevňuje do vřetene stroje a měřicího artefaktu, který se upevní na otočný stůl [11].



Obr. 56 Měřicí zařízení Rotary Analyzer [IBSPE]

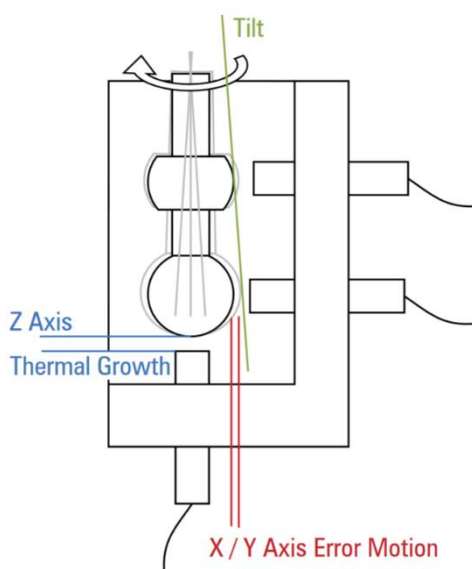
Tab. 8: Parametry zařízení rotary analyzer

Parametr	Hodnota
Nejistota měření	U1d < 1 μm (do 1 mm rozsahu)
	U1d < 1,5 μm (v celém rozsahu)
Rozlišení	0,2 μm
Rozsah měření	3,5 mm
Vzorkování	2 kHz
Hmotnost	770 g
Rozlišení	0,2 μm

2.4.2.6 Spindle Error Analyzer – SAE

SEA je vybaven řadou výkonných kapacitních čidel, které jsou vloženy do měřicího přípravku, který je upnut v případě měření vřeten stroje do vřetene a v případě měření desky stolu na stole. Přípravek může být podle použití jedno nebo dvoukulový. Princip měření (obr. 57) vychází z měření posunutí geometricky „přesného“ artefaktu (chyba tvaru kulovitosti max. 50 nm) vůči kapacitním snímačům. Jedno čidlo měří axiální posunutí v ose Z a další dvě čidla jsou vložena od sebe v úhlu 90° kvůli měření radiálního posunutí v osách X a Y. Pokud artefakt obsahuje druhou kouli, jsou do přípravku upnuty další dvě čidla v osách X a Y z toho důvodu, aby bylo možné měřit i naklonění artefaktu.

Po nastavení testu se artefakt ve vřetenu (na stole) roztočí a jsou sledovány odchylky změřené čidly. Ze získaných výsledků měření je možné posuzovat nejen stav vřetene či stolu, ale také predikovat výsledný tvar geometrie obrobků, povrchovou jakost a určit teplotní chování vřetene/stolu.



Obr. 57 Měření pomocí Spindle Error Analyzer [Lion precision]

Tab. 9: Parametry zařízení Spindle Error Analyzer

Parametr	Hodnota
Měřicí rozsah	125 – 375 μm
Rozlišení pro 15 kHz	20 nm
Chyba linearity	0,2
Max. otáčky pro single ball	60 000 ot/min
Max. otáčky pro double ball	6 000 ot/min
Počet hodnot na otáčku	1 - 5000
Maximální možné rozlišení	3,5 nm

V následující tabulce jsou výše zmíněné metody měření a chyby, které lze těmito zařízeními měřit pouze pro rotační osu C.

Tab. 10: Měření geometrických chyb rotační osy C různými zařízeními

Geometrická chyba	Zařízení				
	Laser Tracer	Ballbar Trace	Laser Interferometr	Obrobkové sondy	Rotary analyzer
EXC	✓	✓	-	-	-
EYC	✓	✓	-	-	-
EZC	✓	✓	-	-	-
EAC	✓	-	-	-	-
EBC	✓	-	-	-	-
ECC	✓	-	✓	-	-
AOC	✓	-	-	✓	✓
BOC	✓	-	-	✓	✓
COC	-	-	-	-	-
XOC	-	-	-	✓	✓
YOC	-	-	-	✓	✓

2.5 ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY OSTATNÍMI VĚDECKO-VÝZKUMNÝMI PRACOVIŠTI

Tématem přesnosti rotačních kinematických dvojic obráběcích strojů se zabývá velké množství výzkumných týmů. Většina publikací má společné charakteristiky a to obecným popisem geometrických chyb rotačních os popsaných v normě (ČSN ISO 230 – 7), co je způsobuje a jak je lze eliminovat. Další část je věnována problematice modelování těchto chyb. Ačkoli jsou tyto metody známé již dlouhou dobu, je vidět že se autoři snaží přijít s novými metodami, popřípadě se tyto modely snaží porovnávat. Bohužel tento vývoj není příliš rychlý vzhledem k velkým nárokům na matematické metody (matematické výpočty), což je nad možnosti většiny autorů. Většina přístupů, s kterými autoři při modelování pracují, je pomocí tzv. Homogeneous Transformation Matrix (HTM). Po popsání geometrických chyb a sestavení matematického modelu se autoři věnují problematice, jak tyto chyby měřit a ověřit vhodnost matematického modelu. Nejvíce využívaný způsob měření je pomocí Double Ballbar. Tento způsob využívají autoři článků [20][21][22][23]. Autoři [24] mají přidanou hodnotu článku v tom, že po modelování, měření a kompenzaci aplikují své poznatky také obrobením testovaného kusu, v tomto případě lopatky. Výsledky jsou porovnány před a po kompenzaci změřených chyb. Způsob identifikace chyb pomocí Double Ballbar označují autoři článků za postačující.

Další možná metoda měření je pomocí laseru zastoupené v převážné většině Laser Tracery, Laser Trackery a interferometry. V této oblasti se v poslední době vyskytlo několik článků s popisem a praktickými výstupy nových typů přístrojů jako např. v článku [25]. Autoři [26] zase popisují měření Laser Tracerem, kdy se měřené pozice měří tzv. On the fly tedy že zařízení měří při průjezdu programovanou dráhou. Měření trackery jsou popsány v [27][28][29][30].

Další možností měření je pomocí R-testu. Toto zařízení se skládá z rámu upevněného na rotační osu. Na té jsou připevněny tři snímače, které snímají přesně vyrobenou kouli upevněnou ve vřetení obráběcího stroje. Postup a výsledky jsou popsány v [31][32][33]. V jiném případě autoři [34] k identifikaci chyb používají obrobkovou sondu a přesných měřících artefaktů. V některých případech autoři [35][36][37] využívají zkušební obrobky (tzv. NASA kus) pro identifikaci chyb rotačních os.

Z výše uvedených článků je vidět zaměření především na matematické modelování rotačních os a poté ověření pouze daným způsobem měření. Chybí zde metodiky měření, které by reflektovaly požadavky iniciativy Průmysl 4.0 a požadavky na další zvyšování přesnosti měření, zejména pak rotačních os. Do současných matematických modelů strojů nejsou integrovány rušivé vlivy, jako jsou změny teplot, které významně ovlivňují požadované vlastnosti strojů. Tyto aspekty bude tedy potřeba dále rozpracovat v rámci řešení dizertační práce.

3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

3.1 MOTIVACE

Neustále 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 nosné struktury a jednotlivých dílů a omezit působení teploty a vibrací na CNC obráběcí stroj jako celek. Nerespektování těchto požadavků se projeví na finálním produktu, tedy na obrobené součásti. Proto výrobci stále hledají možnosti zvyšování statické a dynamické tuhosti při současném zachování pracovní přesnosti.

Toto má však své hranice. Tuhost CNC obráběcích strojů a jejich odolnost lze zvyšovat pouze do určité rozumně technicky a nákladově akceptovatelné hranice, protože za určitých podmínek by se stal stroj neprodejným. Při zvyšování geometrické přesnosti nesmí však být snižována mechanická přesnost vyráběných dílů a jejich následná montáž do stroje. Určitou možnost nabízí vylepšit pracovní přesnost CNC obráběcího stroje pomocí tzv. softwarové kompenzace nepřesností. Výrobci hledají koncepci pro zvyšování jak mechanické, tak i softwarové geometrické (ale nejen jí) 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.

3.2 CÍLE ŘEŠENÍ 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.

3.3 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE

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 (obr. 58) firmou DMG MORI Czech.



Obr. 58 Pohled na stroj DMU 75 monoBlock® [DMG Mori]

Stroj DMU 75 monoBlock® je kinematicky uzpůsoben tak, že má tři lineární pohyby realizované v nástroji ($X=750$, $Y=650$, $Z=560$ mm) a dva rotační pohyby v obrobku (kývání okolo osy X a otáčení okolo osy Z). Vybaven je řídicím systémem Heidenhain TNC 640. Přesnost polohování má tento stroj v jednotlivých osách $8\text{ }\mu\text{m}$.

4 SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP JAKO SOUČÁST SYSTÉMOVÉ METODOLOGIE

4.1 SOUSTAVA A SYSTÉM

Pojem „systém“ se konstituoval v době vzniku teorie systémů (von Bertalanfy – kolem roku 1950). Jeho vznik byl nekoordinovaný a k jeho vlastnostem byly řazeny tyto významy: strukturovanost, organizovanost, uspořádanost, účelovost chování entity, které lze řadit k systémovým vlastnostem entity. Nejednotnost pojmu se projevila v tom, že se pojem systém používal v těchto dvou odlišných významech [38]:

1. význam ve smyslu „entita (objekt) je systémem“, což vyjadřuje skutečnost, že entita má uvedené systémové vlastnosti, nezávisle na tom, zda má reálnou nebo abstraktní podstatu. Takto se pak začal pojem „systém“ používat v nejrůznějších významech: v technice existují systémy:
 - potrubní, mazací, vysílací, tlumicí, řídicí, v lékařství systémy svalově-kosterní, srdečně-cévní;
 - existují systémy hospodářské, politické, herní, postelové, stavební, cihlové, montážní atd.
2. význam v tomto smyslu „systém je abstraktní entitou (objektem)“ vytvořený určitým subjektem S a přiřazený jiné entitě (reálné nebo abstraktní) těmito procesy: abstrakce, zobecnění a formalizace všeho podstatného, co souvisí s řešením konkrétního problému P na entitě Ω , na určité rozlišovací úrovni.

Uvedený dvojí význam pojmu „systém“ anglický jazyk odlišil tím, že začal používat pojmy *real system* pro první význam pojmu systém a pojem *abstract system* pro jeho druhý význam. Mělo se tím předejít lingvistickým zmatkům. Přídavná jména *real* a *abstract* ve spojení se slovem systém se však brzy přestala v Anglii ve většině případů používat (lidé rádi zjednodušují, aniž by domýšleli důsledky) a v takovém „stavu“ se pojem systém dostal i do našeho vnímání [38].

V systémovém pojetí se doporučuje respektovat tato vymezení pro pojem soustava v těchto významech [38]:

- Soustava je na určité úrovni rozlišitelnosti strukturovaná reálná nebo abstraktní entita se systémovými vlastnostmi (strukturovanost, vazby na okolí, cílové chování atd.).
- Systém $\Sigma(\Omega)$ je abstraktní entita účelově vytvořená subjektem na primární entitě Ω (soustavě) z hlediska řešeného problému, přičemž jeho strukturu tvoří formalizované prvky týkající se entity, které jsou z hlediska řešeného problému a na určité rozlišovací úrovni jeho řešení podstatné.

Na základě tohoto výkladu budeme tedy v dalším textu CNC obráběcí stroj mající mimo jiné i rotační kinematické dvojice ve své stavbě považovat za technickou soustavu (reálná entita). Hledanou metodiku sestavenou pomocí systémové přístupu (kap.4.2) za abstraktní entitu.

4.2 SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP

Systémový přístup lze považovat za „kuchařku“, která doporučuje, jaké základní ingredience (v podobě atributů systémového přístupu) mají být součástí našich činností, aby tyto byly zdařile a efektivně vykonány. Systémový přístup je jedním z možných přístupů člověka k realizaci nejrozličnějších činností, zejména těch, které jsou spojeny s různými druhy analýz složitých objektů a procesů na nich probíhajících, s poznávacími procesy, s řešením běžných i odborných problémů, ale i s činnostmi typu myšlení či jednání; zjednodušeně řečeno s různými činnostmi ve vztahu k různým entitám [38].

Lidové vymezení „systémového přístupu, kterému by měl rozumět každý „průměrný vzdělanec“, lze formulovat takto:

Systémový přístup je „náповědou“, na jaké podstatné skutečnosti, týkající se určité entity, by člověk neměl zapomenout ve všech svých činnostech s touto entitou (myšlení, jednání, srovnávací analýzy, řešení problémů) a jak by měl tyto činnosti realizovat.

Nebo:

Systémový přístup je zjednodušená tvůrčí metodologie myšlení a konání jedince aplikovatelná na jakékoli systémové entity, přičemž tato metodologie je tvořena posloupností uvědomělých, popsatečných, realizovatelných, případně i formalizovaných činností, respektujících atributy systémového přístupu [38].

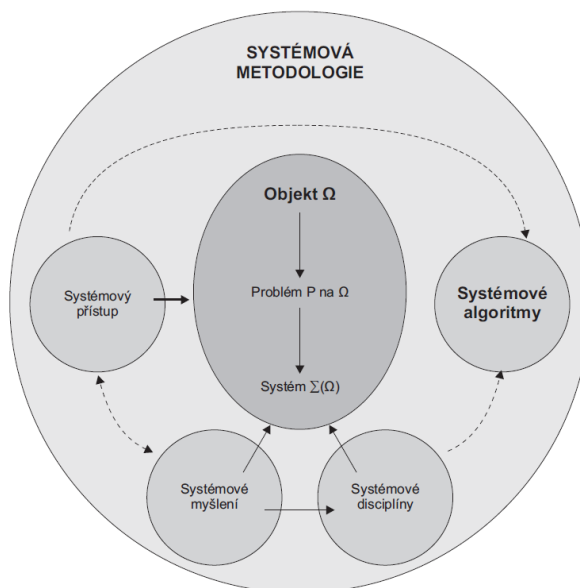
Systémové atributy lze rozčlenit do těchto pěti podskupin [38]:

1. Podskupina je tvořena třemi atributy, které lze považovat za premisy pro aplikaci systémového přístupu:
 - Atribut A0 – vymezení entity zájmu subjektu.
 - Atribut A1 – požadavek pojmové čistoty.
 - Atribut A2 – správné vymezení a formulace problému.
2. Podskupina obsahuje atributy, které doporučují, jak se má přistupovat k analyzovaným entitám a k na nich formulovaným problémům:
 - Atribut A3 – entity posuzovat strukturovaně.
 - Atribut A4 – entity posuzovat účelově – podstatnost.
 - Atribut A5 – entity posuzovat komplexně.
 - Atribut A6 – entity posuzovat hierarchicky.
 - Atribut A7 – entity posuzovat orientovaně.
3. Třetí podskupina atributů doporučuje, jaké vlastnosti se mají u entit posuzovat:
 - Atribut A8 – entity posuzovat z hlediska otevřenosti – okolí entity.
 - Atribut A9 – entity posuzovat z pohledu úrovně vyváženosti.
 - Atribut A10 – entity posuzovat z hlediska dynamičnosti.
 - Atribut A11 – entity posuzovat z hlediska stochastičnosti a determinističnosti.
 - Atribut A12 – posuzovat cílového chování entit.
 - Atribut A13 – posuzovat entity z hlediska výskytu deterministického chaosu a samoorganizace.

4. Atributy této skupiny doporučují, aby veškeré činnosti člověka byly realizovány na současné úrovni poznatků vědy a techniky a s využitím progresivních metodologicko-vědeckých trendů:
 - Atribut A14 – využívat poznatky současné vědy a techniky.
 - Atribut A15 – pro řešení nestandardních situací používat progresivní a heuristické přístupy.
 - Atribut A16 – vytvářet „algoritmy činností“.
 - Atribut A17 – analyzovat výsledky řešení problémů.
5. Pátá podskupina se zabývá etickými aspekty subjektů k entitám, a to odpovědností za věrohodnost výsledků řešení problémů, dodržováním veškerých etických norem a zájmem o implementaci výsledků řešení a jejich důsledků v okolí entity:
 - Atribut A18 – mít odpovědnost za věrohodnost předávaných výsledků řešení.
 - Atribut A19 – dodržovat veškeré etické normy.
 - Atribut A20 – sledovat způsob implementace výsledků.

4.3 SYSTÉMOVÁ METODOLOGIE

Systémová metodologie by měla být metodologií „ve službách“ teorie systémů (v pojetí této publikace „soustav“), zejména při řešení problémů na systémech. Obecně je při řešení každého problému důležitá jeho analýza, zejména z hlediska toho, co je pro jeho řešení podstatné a jak správně stanovit cíle jeho řešení. Neméně důležitý je i výběr metody řešení problémů a sestavení algoritmu řešení touto metodou. Vybrat efektivní metodu řešení vyžaduje mít přehled o všech technických a vědeckých disciplínách, které s problémem souvisejí. A nakonec: pro řešení každého problému je důležité systémově myslet. Z uvedené analýzy vychází, že systémovou metodologií (obr. 59) je vhodné chápat jako průnik systémového přístupu, systémového myšlení, systémových disciplín (oborů, metod) a systémových algoritmů. Tuto skutečnost lze považovat za nový přístup k systémové metodologii [38].



Obr. 59 Struktura systémové metodologie [38]

5 SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP PRO PREDIKOVÁNÍ VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ ROTAČNÍCH KINEMATICKÝCH DVOJIC CNC OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

5.1 POPIS SYSTÉMOVÝCH ATRIBUTŮ PREDIKOVÁNÍ VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ ROTAČNÍCH KINEMATICKÝCH DVOJIC CNC OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

Struktura následujícího textu bude vytvořena dle kapitoly 4.2, kde byly představeny atributy systémového přístupu. CNC obráběcí stroj, který má ve své kinematické struktuře rotační kinematické dvojice, budeme považovat za technickou soustavu. Na této technické soustavě budeme nyní aplikovat systémový přístup.

Zejména nás budou zajímat takové obráběcí stroje, které mají vestavěny rotační osy pro obrobek (kapitola 2.2.3) – *atribut A0*. Z hlediska pojmové čistoty budeme v dalším textu používat všechny zavedené a běžně používané pojmy pro oblast metrologie a zkušebnictví CNC obráběcích strojů – *atribut A1*.

Důvodem pro výběr rotačních kinematických dvojic pro obrobek je zkrácení doby měření vzhledem k finanční náročnosti nevýrobního prostroje stroje. Pokud bychom prověřovali také rotační kinematické dvojice pro nástroj, bylo by třeba delšího času. Dalším neméně důležitým důvodem je přístup k instalovaným strojům u uživatelů. Jedná se o velmi drahé investiční celky (desítky milionů korun) a každá hodina mimo výrobu je pro podnikatele ztrátou 8.000 Kč. Poznamenejme však, že i když došlo k výběru rotačních kinematických dvojic pro obrobek, bude systémový přístup a potažmo metodika použitelná pro predikování vlastností u obou druhů rotačních kinematických dvojic.

Při predikování vybraných vlastností u CNC obráběcích strojů nás teoreticky zajímají následující vlastnosti rotačních os pro obrobek (*atribut A2*):

- A. Nekompenzovaná rotační osa:
 - a) geometrická přesnost;
 - b) přesnost polohování;
 - c) volumetrická přesnost;
 - d) pracovní (výrobní) přesnost.
- B. Kompenzovaná rotační osa
 - a) geometrická přesnost;
 - b) přesnost polohování;
 - c) volumetrická přesnost;
 - d) pracovní přesnost.

Z hlediska prováděné predikce (předpovědi) vybraných vlastností vybereme následující vlastnosti, které můžeme vlastními silami prověřit a zapracovat do připravované metodiky:

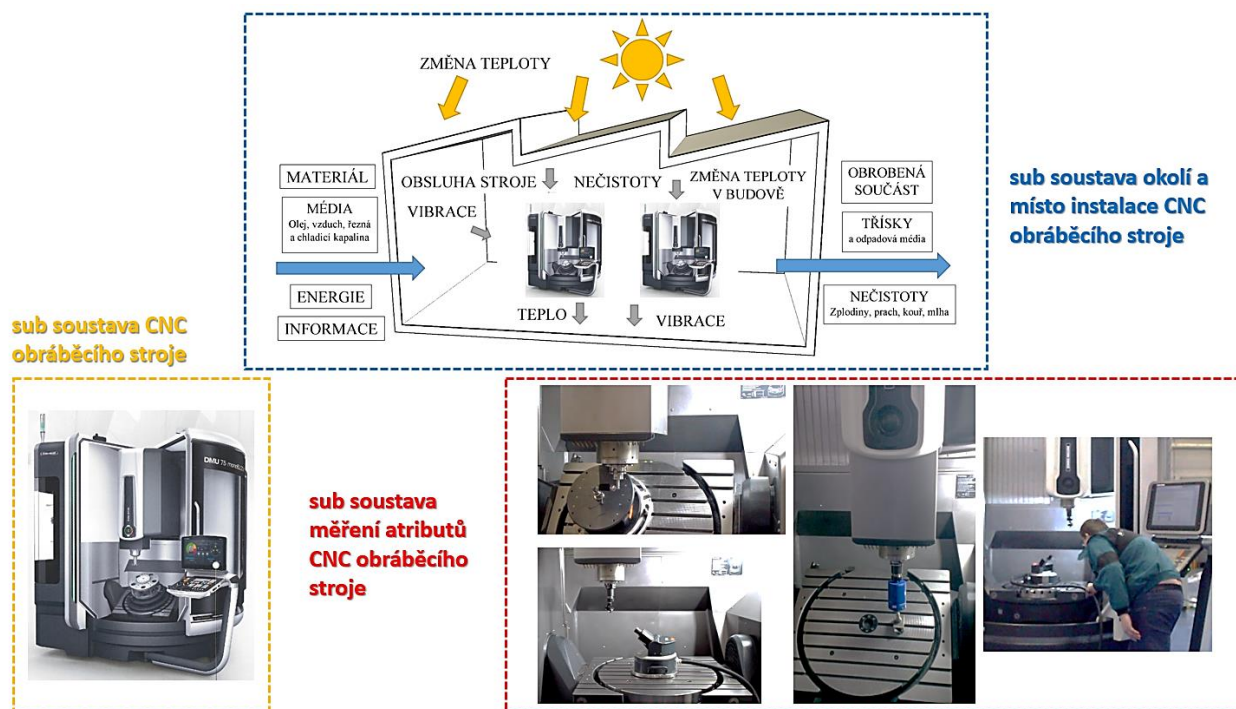
- A. Nekompenzovaná rotační osa: c).
- B. Kompenzovaná rotační osa: c).

Půjde mimo jiné také o následující předpoklady:

- pokud má rotační osa pro obrobek v nějaké kvalitě konstrukční provedení, tak vykazuje při ověřování vlastností dle výše uvedeného atributu A2 tomu odpovídající hodnoty pro neprovedenou kompenzaci, kterou ale lze kompenzací vylepšit (např. volumetricky);
- pokud ale bude konstrukční provedení vylepšeno (což lze predikovat podle výsledků měření), je předpoklad, že dojde ke zlepšení nekompenzovaných i kompenzovaných hodnot.

Strukturované posuzování vybraných vlastností rotačních os pro obrobek (*atribut A3*) je nutné provádět z pohledu tří vzájemně provázaných a ovlivňujících se sub soustav (obr. 60):

1. místa instalace CNC obráběcího stroje, kde působí vlivy - **sub soustava okolí**:
 - okolí (změny teploty, vibrace, nečistoty, zplodiny.....);
 - obsluha stroje;
 - energetický tok;
 - materiálový tok.
2. vlastního konstrukčního provedení rotační osy pro obrobek – **sub soustava CNC obráběcího stroje**:
 - konstrukční provedení CNC obráběcího stroje a jeho odolnost proti změnám teploty a vibracím.
3. měřicí prostředky – **sub soustava měření atributů CNC obráběcího stroje**:
 - strategie měření;
 - nejistoty měření;
 - verifikace výsledků.



Obr. 60 Vlivy působící na CNC obráběcí stroj v místě instalace

Všechny tři sub soustavy z obr. 60 se vzájemně ovlivňují, a to velmi výrazně a jsou tedy podstatné – účelové (*atribut A4*). Musíme je tedy posuzovat komplexně. Jde o následující možné interakce:

- změna teploty sub soustavy okolí ovlivní chování sub soustavy CNC obráběcího stroje a tím i sub soustavu měření atributů CNC obráběcího stroje, tak že měříme nesprávné hodnoty, které reflektují náhlou změnu teploty;
- pokud není provedena kalibrace sub soustavy měření atributů CNC obráběcího stroje na aktuální teplotu, dochází k měření neodpovídajících hodnot.

Vzhledem k výše uvedenému atributu A4 (podstatnost), a vzájemně uvedeným interakcím je nutné všechny tři sub soustavy z obr. 60 posuzovat komplexně (*atribut A5*). Existují zde tedy vnější vazby (interakce se sub soustavou okolí) a vnitřní vazby (interakce CNC obráběcího stroje s měřícím zařízením).

Hierarchické posuzování všech tří entit (sub soustav z obr. 60) – *atribut A6*, lze chápat tak, že sub soustava CNC obráběcího stroje a sub soustavy měření atributů CNC obráběcího stroje jsou na stejné úrovni podřízeny sub soustavě okolí a to zejména z důvodu kardinálního vlivu na chování stroje a měřidel. Z těchto důvodů je nutné věnovat sub soustavě okolí maximální pozornost, protože významným způsobem bude ovlivňovat to, co naměříme. Tyto výsledky mohou fatálně ovlivnit rozhodnutí přijatá na základě jejich špatných hodnot.

Mezi všemi třemi sub soustavami existuje časová orientovanost (*atribut A7*), protože podmínky sub soustavy okolí (hodnota vnější teploty, vibrací, únava obsluhy.....) se mohou v krátkém čase měnit. Z těchto důvodů je nutné měření provádět v co nejkratším čase. Pokud to není možné tak je nutné při delším časovém období (odhadujeme cca 5 hodin) výsledky verifikovat pokud je to možné jinou měřicí metodou. Tím je vyjádřena i jejich příčinná orientovanost.

Vzhledem k výše uvedenému atributu A4 (podstatnost), a vzájemně uvedeným interakcím je sub soustava CNC obráběcího stroje a sub soustava měření atributů CNC obráběcího stroje otevřená vůči sub soustavě okolí (*atribut A8*) a mohou tak vzájemně provádět interakce.

Všechny tři sub soustavy z obr. 60, z hlediska jejich struktury mají takovou úroveň vlastností, která přispívá k cílovému predikování vlastností rotačních kinematických struktur. Jde zejména o jejich odezvu na změnu teploty, úroveň vibrací a zásahy obsluhy (*atribut A9*). Z tohoto pohledu je úrovněová vyváženost přibližně stejná.

Časová závislost projevů chování je u všech tří sub soustav dynamická (*atribut A10*). Mohou existovat konstrukční řešení CNC obráběcího stroje, která mají v sobě vestavěná řešení odolávající změnám teploty anebo vibrací v sub soustavě okolí. Pak tuto sub soustavu můžeme považovat za statickou. Dle našich odhadů je to však pouze 10% řešení na trhu. Zde je potřeba postupovat individuálně. Stejně tak záleží na obsluze sub soustavy měření atributů CNC obráběcího stroje, kdy si uvědomí, že došlo ke změně teploty v okolí. Proto je nutné neustálé sledování a vyhodnocování změn teploty okolí

Vzhledem k tomu, že sub soustava měření atributů CNC obráběcího stroje uvažuje s pojmem nejistota, tak je tato entita staticky stochastická. Ostatní dvě sub soustavy jsou deterministické (*atribut A11*).

Za cílové chování (*atribut A12*) považujeme projev stavu všech sub soustav z obr. 60 a patří sem zejména:

- funkčnost;
- spolehlivost;
- opakovatelnost měření;
- verifikaci naměřených hodnot;
- ekonomičnost;
- krátký čas.

Při predikování vybraných vlastností rotačních os pro obrobek je nutné zabránit nepředvídatelnosti, nejednoznačnosti, nesrozumitelnosti, nepřehlednosti obsluhy CNC obráběcího stroje a měřících prostředků vůči všem třem sub soustavám (subjektový chaos ve svém okolí – *atribut A13*). Objektový chaos u všech sub soustav nepředpokládáme.

Při návrhu metodiky budeme využívat ve všech třech sub soustavách poznatky současné vědy a techniky (*atribut A14*). Za nestandardní situace (*atribut A15*) považujeme následující:

- náhlé přerušení dodávky elektrické energie během měření;
- náhodné selhání měřících prostředků;
- náhodné selhání řídicího systému CNC obráběcího stroje;
- vznik náhlé a živelné katastrofy v okolí místa instalace (povodeň);
- náhlé zdravotní obtíže obsluhy CNC obráběcího stroje a sub soustavy měření atributů CNC obráběcího stroje.

Tyto nestandardní situace reprezentují rizikové faktory a jejich existenci musíme vzít v úvahu, ale pro naše další úvahy je nebudeme zohledňovat tím, že budeme používat progresivní a heuristické přístupy.

Algoritmus (*atribut A16*) jako posloupnost činností bude představen v samostatné kapitole 5.2. Analýza výsledků měření (*atribut A17*) je v našem případě samozřejmostí, protože po provedené predikci vybraných vlastností bez dalších potřebných zásahů do sub soustavy CNC obráběcího stroje a jejich ověření v provozu by byla predikce pouhou teoretickou úvahou.

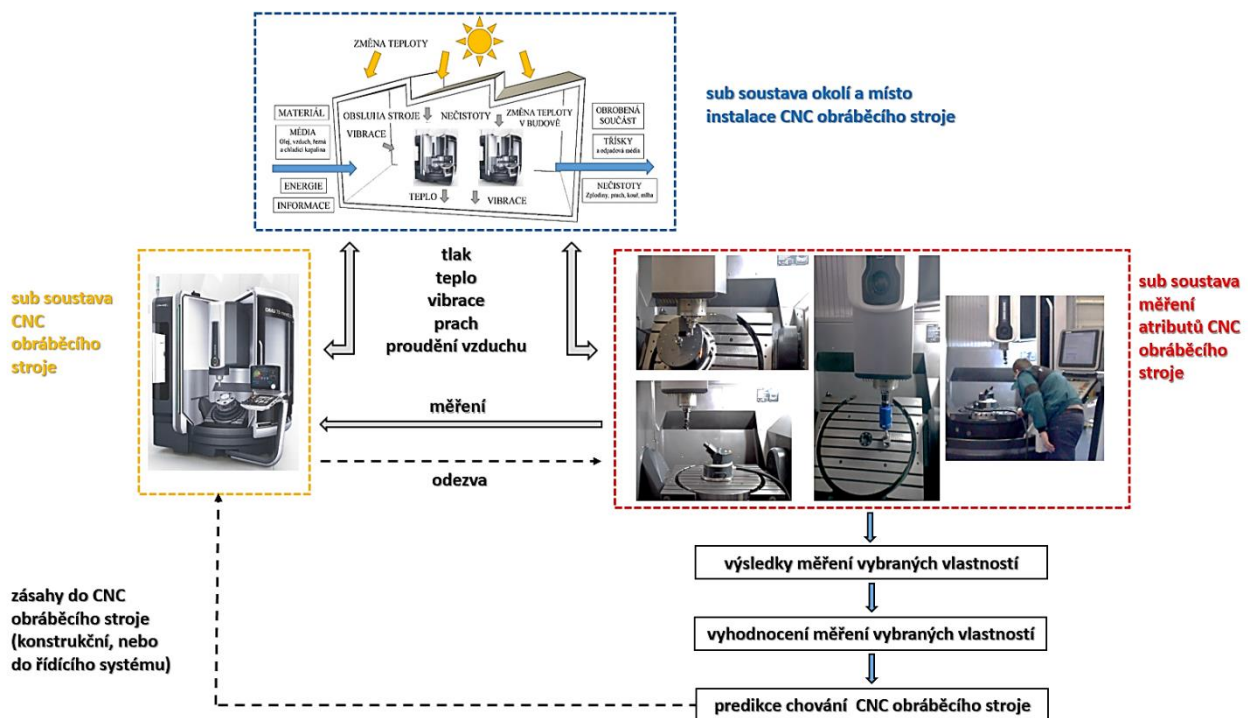
Odpovědnost za výsledky měření (*atribut A18*) a dodržování etických norem (*atribut A19*) můžeme považovat také za samozřejmost, protože bez těchto atributů by nemohl případný zákazník z průmyslové praxe očekávat věrohodnost navržené metodiky. Dlouhodobé sledování implementace výsledků (*atribut A20*) povede k odhalení nedostatků, které by se mohly objevit i přes aplikaci systémového přístupu. Dnešní digitální éra nabízí nespočet možností, jak být přítomen u CNC obráběcího stroje „na dálku“ např. pomocí videokamer, nebo reálnému sledování přes cloud zákazníka. Je však důležité zmínit, že sledování bude vždy o něco zpožděné vlivem přenosu informací.

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

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 (kap.5.1).

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.

Při respektování výkladu z kapitoly 4 a po předešlé diskuzi v kap.5.1 můžeme hrubé schéma metodiky znázornit na obr. 61. Vedlo by ke značné nepřehlednosti, pokud bychom zde znázornili všechny detaily. Tu uvedeme podrobně v následujícím textu této kapitoly.



Obr. 61 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 jakéhokoliv 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:

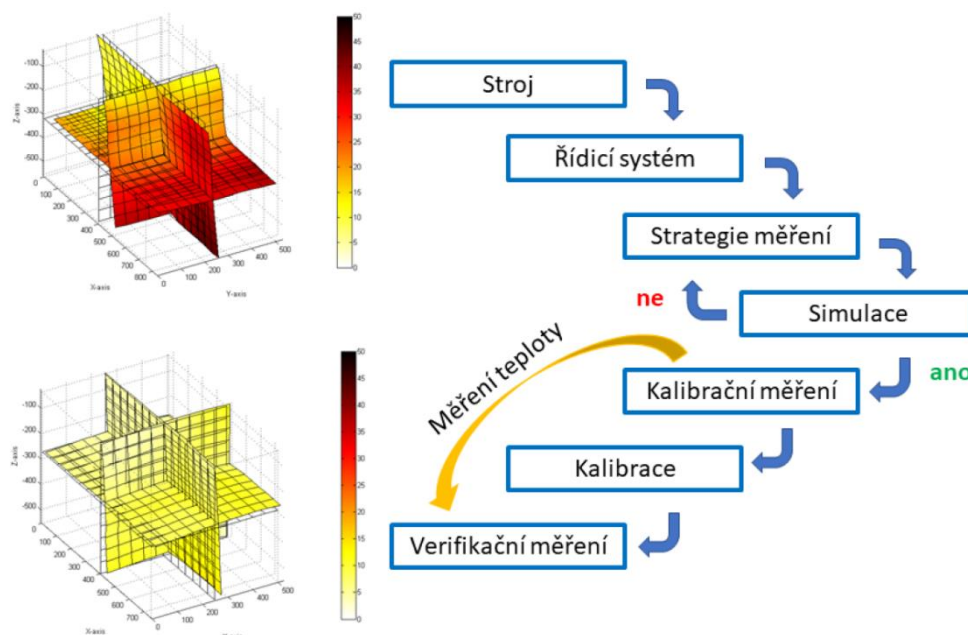
- ověření funkčnosti CNC obráběcího stroje;
- kontrola otevřenosti (přístupu) SW řídicího systému CNC obráběcího stroje a jeho nastavení pro měření;
- kontrola temperování měřeného CNC obráběcího stroje;
- kontrola teploty měřeného CNC obráběcího stroje.

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

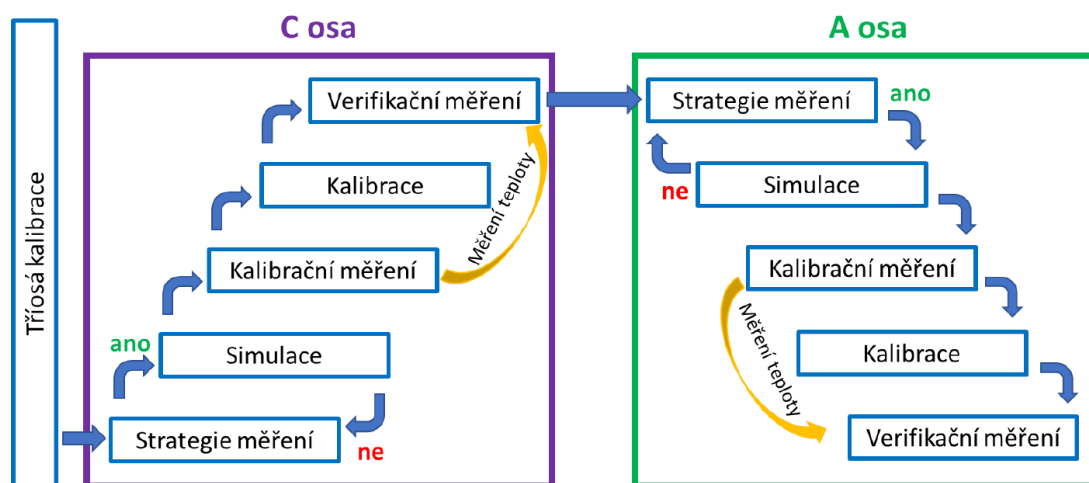
Prováděcí plán měřícího procesu sestává z následujících činností:

- stanovení strategie měření sestává z:
 - 1. volby měřícího 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 měřící aparatury;
- kalibrace měřidel.

Vše souhrnně naznačují následující obrázky (obr. 62 a obr. 63), kde je pro doplnění uvedena také činnost při měření tříosých CNC obráběcích strojů.



Obr. 62 Nasazení vybraných měřicích zařízení při zavádění volumetrických kompenzací pro tříosá obráběcí centra [11]



Obr. 63 Nasazení vybraných měřicích zařízení při zavádění volumetrických kompenzací pro víceosá obráběcí centra [11]

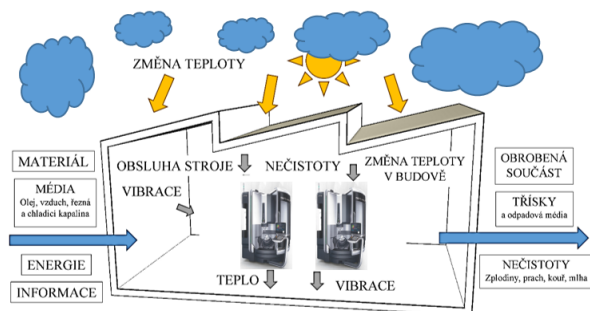
Náležitou pozornost je nutné věnovat výběru vhodného měřidla a to zejména z důvodu toho, že ne všechna jsou vhodná pro měření za určitých podmínek, stavu stroje a požadavku na měřenou veličinu včetně její přesnosti. Vše budeme ilustrovat na následujících obrázcích (obr. 64 a obr. 65, které demonstrují, kolik chyb se vyskytuje v celém kinematickém řetězci tří osých a pěti osých obráběcích center. Charakteru chyb odpovídají také možnosti měřidel (obr. 66) a tím jejich volba.

E. Vyhodnocení a analýza naměřených dat.

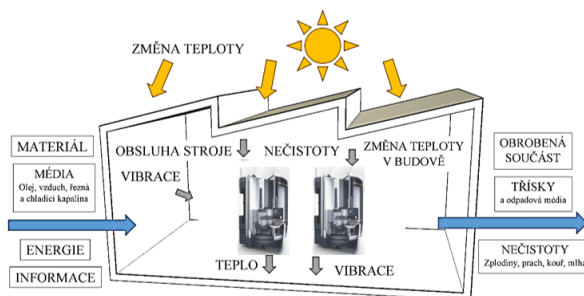
Vyhodnocení a analýza naměřených dat se stává z:

- interpretace výsledků měření.

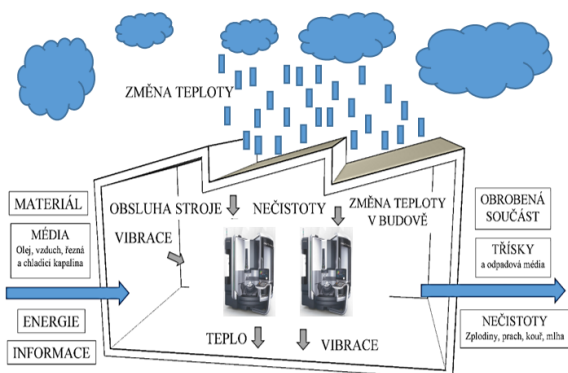
Interpretací výsledků měření rozumíme zvážení, zda roční období, kdy bylo provedeno měření, nehraje zásadní roli pro zamýšlenou udržitelnost případných SW zásahů (kompenzací). V případě, že usoudíme, že má toto zásadní vliv, pak je nutné provést měření a tím i zásahy pro každé roční období zvlášť, protože je charakterizováno jiným projevem, zejména teplotním (obr. 67). Jde především o změnu vnějších teplotních podmínek, tedy vně budovy haly, kde je stroj instalován.



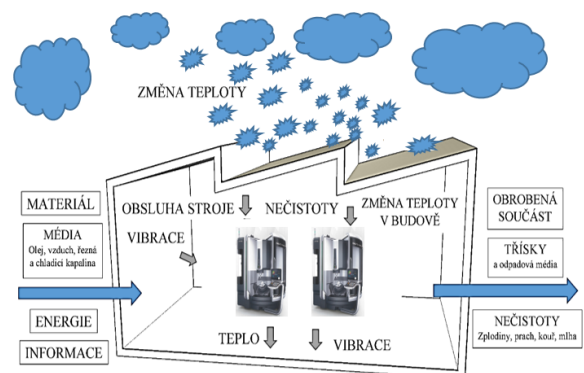
jaro: střídání teplot (postupné oteplování)



léto: velká teplota (stabilně)



podzim: střídání teplot (postupné ochlazování)



zima: vytápění (teplota pod nulou)

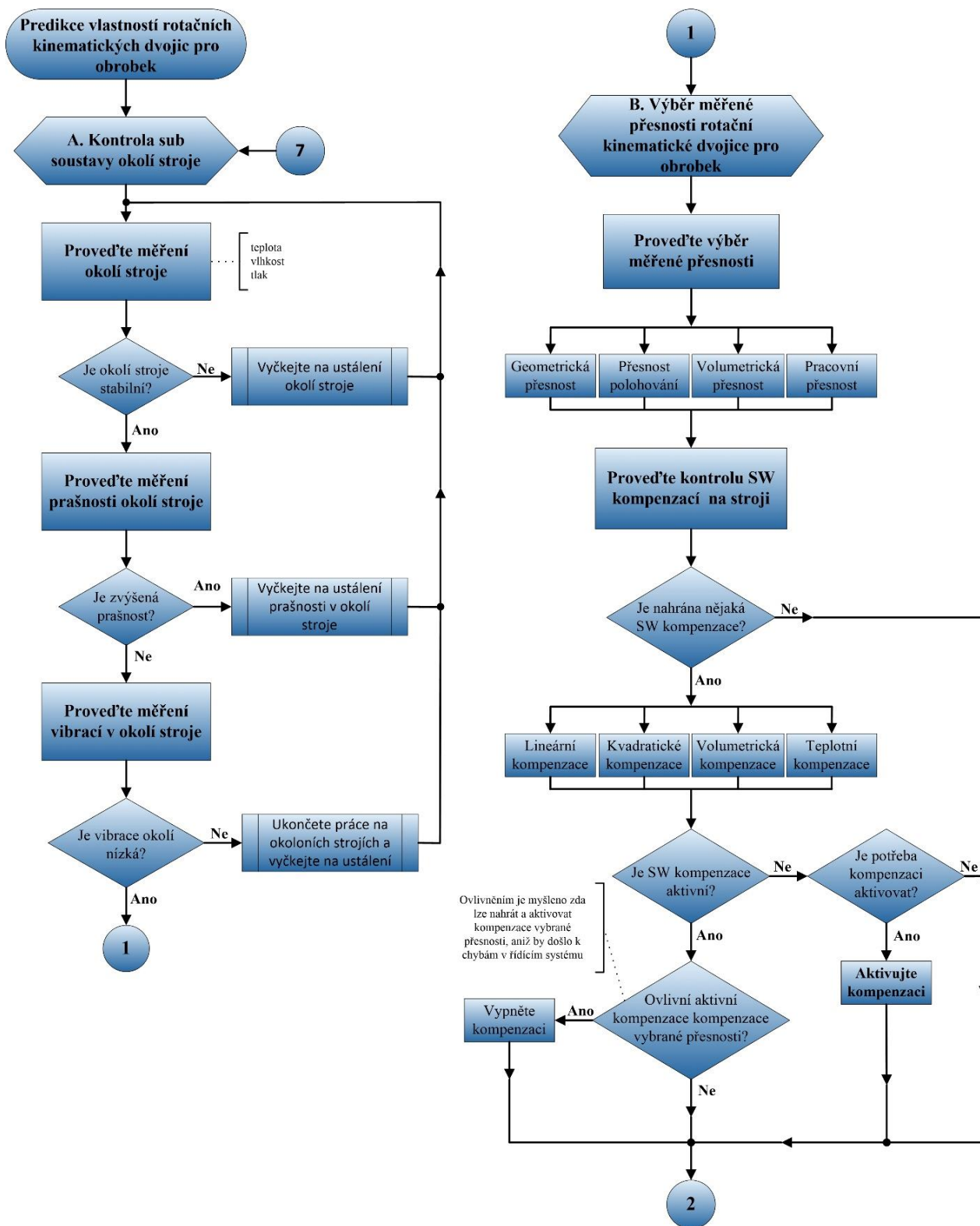
Obr. 67 Strategie predikce chování CNC obráběcího stroje pro čtvero ročních období

F. Predikce vybraných vlastností rotačních os CNC obráběcího stroje.

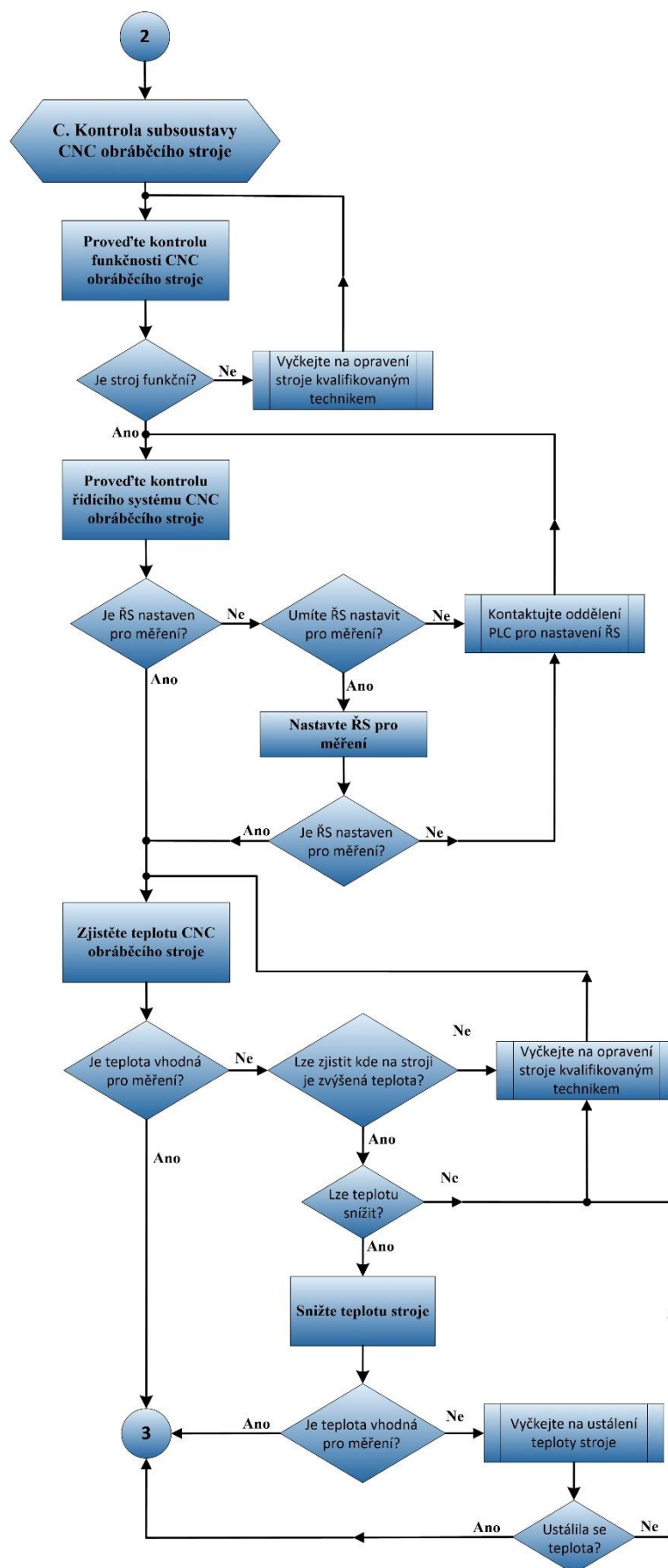
Predikce vybraných vlastností rotačních os CNC obráběcího stroje sestává z:

- 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.

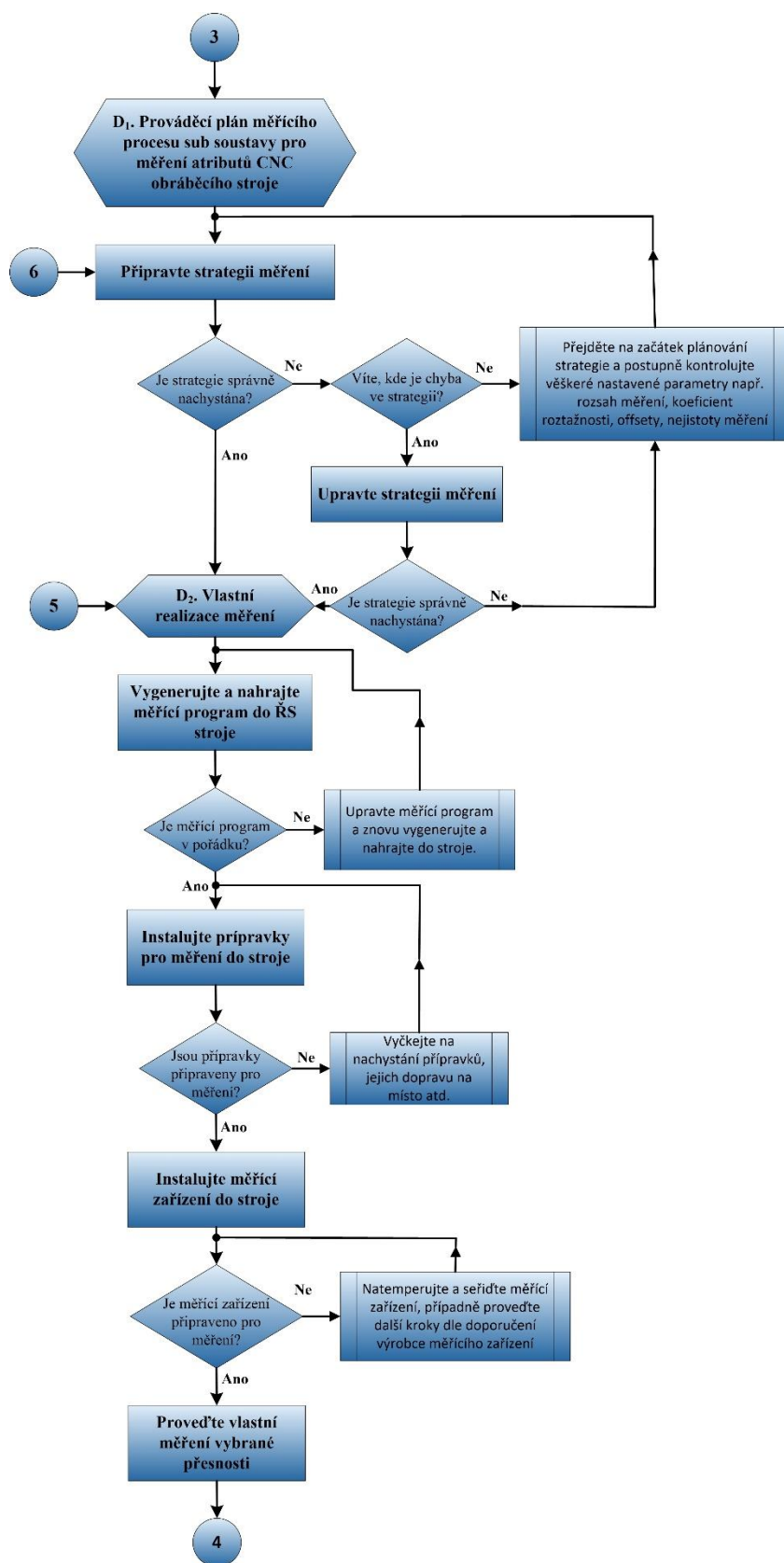
Výše popsaná metodika je formou vývojového diagramu znázorněna na obr. 68 - 71.



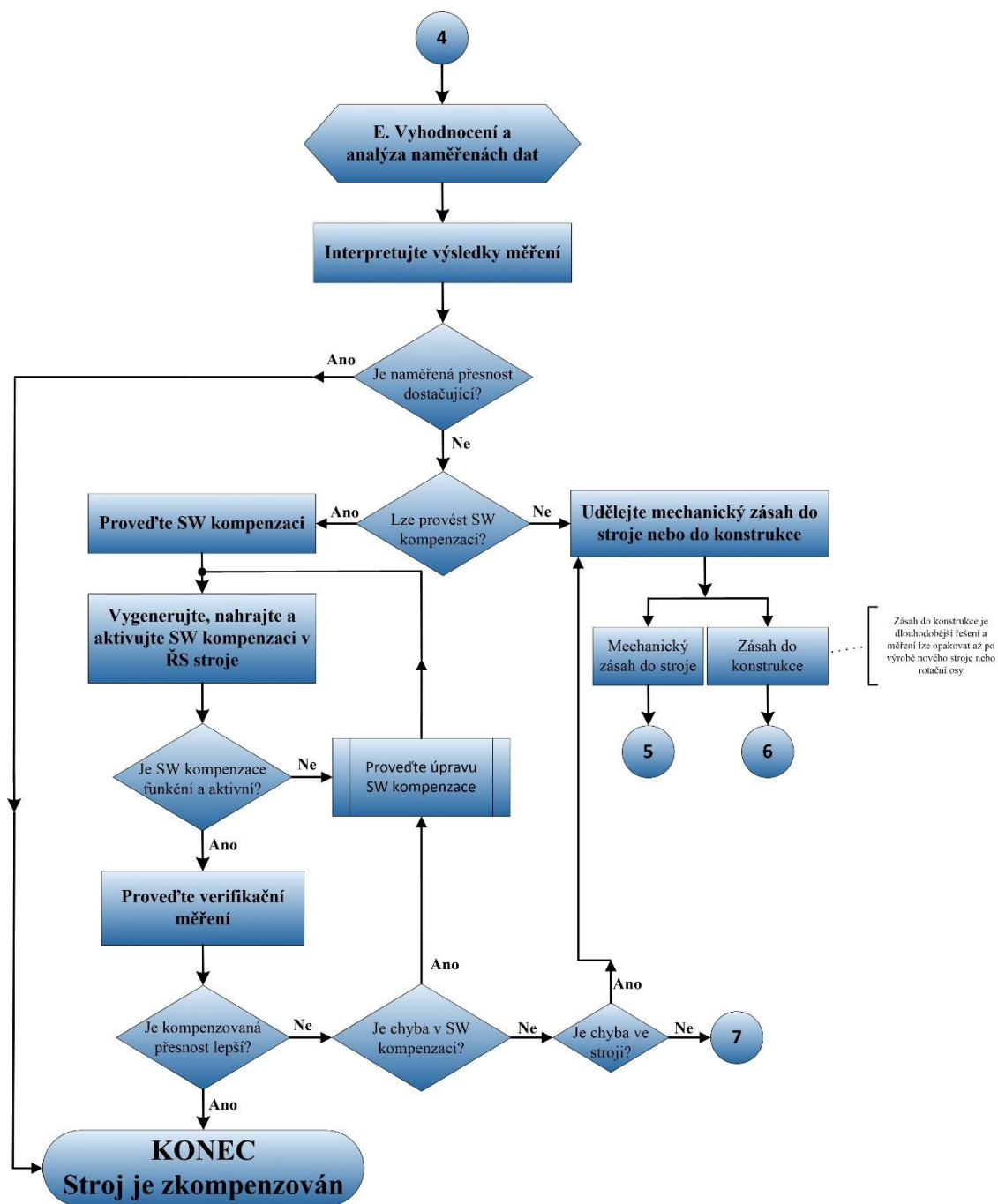
Obr. 68 Metodika pro predikování vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic pro obrobek u CNC obráběcích strojů – část A



Obr. 69 Metodika pro predikování vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic pro obrobek u CNC obráběcích strojů – část B



Obr. 70 Metodika pro predikování vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic pro obrobek u CNC obráběcích strojů – část C



Obr. 71 Metodika pro predikování vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic pro obrobek u CNC obráběcích strojů – část D

6 PŘÍPADOVÉ STUDIE PREDIKCE VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ ROTAČNÍCH KINEMATICKÝCH DVOJIC

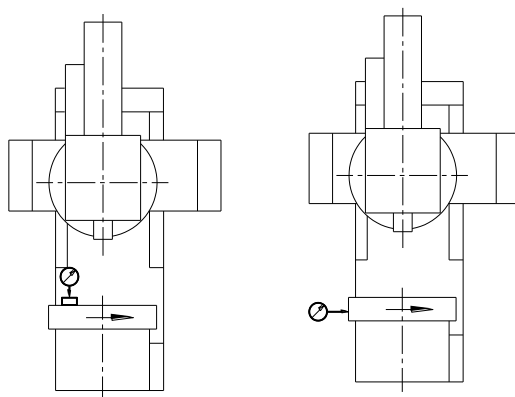
6.1 VÝBĚR VLASTNOSTÍ ROTAČNÍCH OBROBKOVÝCH KINEMATICKÝCH DVOJIC PRO JEJICH PREDIKCI

Při predikování vybraných vlastností kinematických dvojic u CNC obráběcích strojů, jak bylo řečeno v kap.5.1, nás teoreticky zajímají následující vlastnosti rotačních os pro obrobek (kompenzované i nekompenzované):

- a) geometrická přesnost;
- b) přesnost polohování;
- c) volumetrická přesnost;
- d) pracovní přesnost.

Geometrická přesnost je základní podmínkou pro to, aby stroj splňoval všechny požadavky na něj kladené při obrábění. Je tedy žádoucí, aby výrobci věnovali této skutečnosti velkou pozornost. Případné nedostatky lze do jisté míry elektronicky zkompenzovat, nicméně existuje jistá mez odvislá od typu stroje. Geometrická přesnost obráběcího stroje se obvykle skládá z [9]:

- měření úchylek tvaru a polohy a rozměrů dílčích obrobených částí jednotlivých pohybových os;
- měření pohybových celků (os, obr. 72);
- měření geometrické přesnosti stroje jako celku
- měření geometrických chyb a přesnosti rotačních (kap. 2.3.3 a kap.2.4.2) a přímočarých os (kap.2.3.2.1. a kap.2.4.1).



Obr. 72 Měření geometrické přesnosti stroje (čelní a obvodové házení) desky stolu u svislého soustružnického obráběcího centra firmy TOSHULIN

Uvedenou geometrickou přesností dle obr. 72 se nebudeme pro predikování vlastností obrobkových kinematických dvojic u CNC obráběcích strojů dále zabývat. Je zejména z toho důvodu, že se jedná o běžný kontrolní proces ve výrobní firmě a je možné ho získat z geometrických protokolů.

Všeobecně řečeno se přesnost polohování vztahuje na schopnost stroje umístit špičku nástroje na předem programovaný cíl. Existují však různé způsoby měření této schopnosti, a – co je nejdůležitější – různé země mají různá pravidla. Když japonský výrobce obráběcího stroje uvádí "přesnost" svého stroje, obvykle odkazuje na čísla norem JIS B 6201 nebo JIS B 6336 nebo JIS B 6338, JIS B 6201 se vztahuje na konvenční a NC obráběcí stroje všeobecně, JIS B 6336 se vztahuje na obráběcí centra a JIS B 6338 se vztahuje na svislá obráběcí centra. Evropané a obzvláště Němci obvykle odkazují na "směrnice" VDI/DGQ 3441 (Směrnice VDI/DGQ jsou právě to – doporučení. Nejsou spojovány s normami publikovanými v rámci systému DIN /DIN = Německý institut pro normalizaci). Američtí výrobci strojů obvykle odkazují na "definice" NMTBA – Asociace pro výrobní technologie. Tyto definice vyplynuly ze studie uskutečněné Národní asociací výrobců obráběcích strojů a vydané v roce 1968 (a později aktualizované). Často tyto normy, směrnice a definice jsou koordinovány s normami, směrnici a definicemi [39].

Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO), pro kterou je výhradním zástupcem v USA Americký národní normalizační institut (ANSI, New York). Když se uvádí přesnost NC obráběcího stroje, je proto nutné si uvědomit, podle které metody se postupovalo. V rámci měnicích se statistických pravidel pro stanovení přesnosti, obráběcí stroj, který se například řídí pravidly JIS, může vykazovat čísla podstatně lepší, než je tomu u stejného stroje, který se řídí buď německými pravidly VDI nebo americkými NMTBA. Naštěstí existuje mezinárodní norma ISO 230-2, která byla zavedena v roce 1988. Naneštěstí však ne každý přechází co nejrychleji na tuto normu, a mnozí výrobci obráběcích strojů stále odkazují na svou vlastní původní metodu. Proto je důležité, aby byly správně pochopeny všechny čtyři metody. To, co je rovněž matoucí, je skutečnost, že některé stejné termíny použité v různých metodách mají odlišné významy, a rozdílné termíny mají stejný význam. Podstatné je, že výrobci obráběcích strojů – ať již vědomě nebo ne – možná pletou termíny v jejich prodejní literatuře [39].

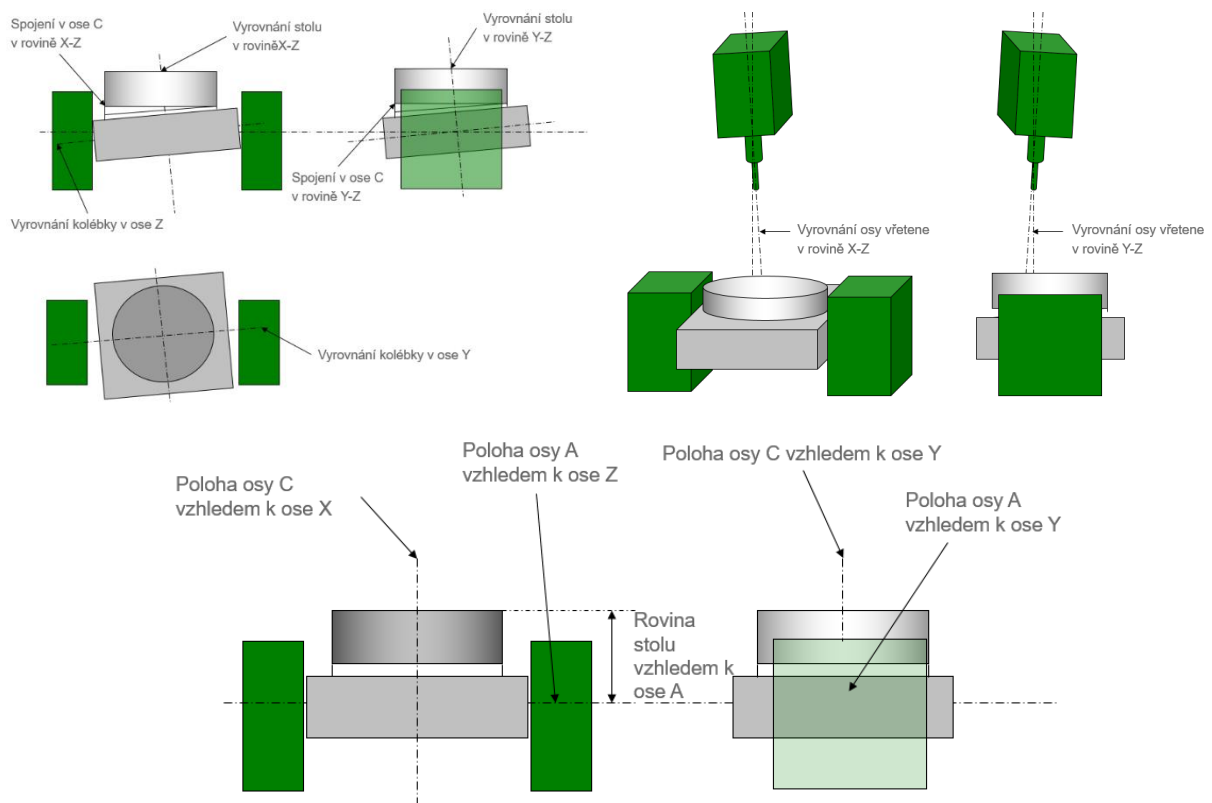
Přesnost je možná citována tam, kde se ve skutečnosti odkazuje na to, co je odchylka, což působí o hodně lépe, než je skutečná přesnost. Navíc opakovatelnost, která je vždy lepší než přesnost, se možná uvádí jako přesnost. Všechny tyto normy nebo směrnice, kromě normy JIS, se zakládají na statistickém vzorkování počtu pojezdů do cílových bodů podél číslíkové řízené osy obráběcího stroje. Klíčové rozdíly jsou [39] :

- počet cílových bodů;
- počet pojezdů;
- zda jsou tyto pojezdy prováděné v jednom směru nebo v obou směrech, a co je nejdůležitější;
- jak se vypočítají přesnosti a jiné termíny.

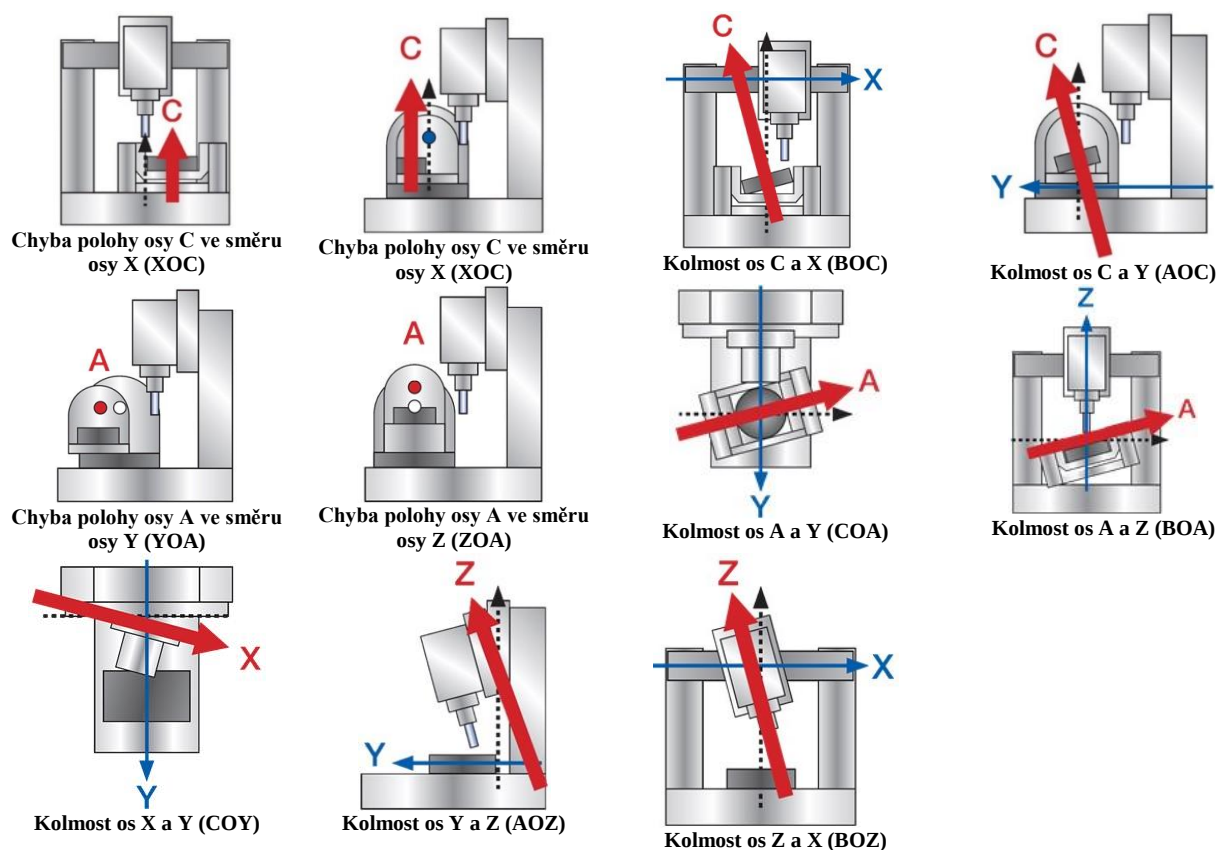
I přes tyto rozdílnosti norem a zajímavá srovnání, která by mohla vzniknout, se přesností polohování nebudeme pro predikování vlastností obrobkových kinematických dvojic u CNC obráběcích strojů dále zabývat. Je zejména z toho důvodu, že se jedná o běžný kontrolní proces ve výrobní firmě a je možné ho získat z protokolů přesnosti. Taktéž je běžnou průmyslovou praxí provádět vyhodnocování dle uvedených norem.

Kompenzacemi všeobecně v obráběcích strojích označujeme souhrn jistých postupů, jimiž se zdokonalují určité vlastnosti (např. přesnost polohování, pracovní přesnost apod.). Pod tímto pojmem se ukrývají technická řešení mající za úkol eliminaci širokého spektra „neduhů“, které se týkají jak samotného stroje, tak obrobku, nástroje a které vznikají při procesu obrábění. V obráběcích strojích se realizují tzv. elektronicky. Elektronická kompenzace má minimalizovat (odstranit) nepřesnost stroje [9]:

- geometrickou vzniklou při jeho výrobě (obr. 73);
- související s opotřebením pohybových částí (obr. 73);
- vzniklou za provozu (pracovní nepřesnost) zahrnující poddajnost jeho výkonných částí;
- související s chybami řízení (obr. 73);
- způsobené teplotními deformacemi.



Obr. 73 Příklad kompenzovatelných chyb u pětiosých CNC obráběcích strojů [Renishaw]



Obr. 74 Příklad kompenzovatelných chyb u pětiosých CNC obráběcích strojů pomocí technologického cyklu 5-Axis Auto Tuning [Okuma]

Je však nutné poznamenat, že kompenzování je až doplňkovou možností. Je nutné mít stroj od výrobce v [9]:

- dostatečné tuhosti statické, dynamické, teplotní;
- kondici po mechanické stránce (geometrická přesnost a přesnost polohování);
- dobré odolnosti vůči vnějším rušivým vlivům.

Jak pojem napovídá, prostředky kompenzace jsou založeny na elektronických principech – celý proces se neobejde bez měření, řízení, programového vybavení atd., přičemž fyzická realizace je elektro-mechanická. Stroj se kompenzuje jak ve statickém, tak dynamickém stavu. Statický stav patří do kategorie geometrické přesnosti, dynamický stav má blízko k pracovní přesnosti [9].

Některé druhy kompenzací jsou nedílnou součástí řídicího systému stroje, a proto jsou dodávány s novým strojem. Když je stroj po záruce, kompenzace realizuje uživatel buď vlastními silami nebo know-how a potřebná zařízení poptává jako službu. Řada kompenzací souvisí s obráběním konkrétního obrobku a jsou součástí programu, který slouží pro jeho výrobu. Existují například možnosti kompenzace změny rozměru nástroje (jeho opotřebení, popř. zvětšení vlivem ulpívání materiálu na břitu nástroje), jeho délku nebo jeho deformace (obvykle prohnutí).

Méně časté jsou kompenzace změny rozměru obrobku, např. vlivem upínacích sil – v tomto případě je snaha problém vyřešit na úrovni mechanické (konstrukce a vhodné provedení přípravku), avšak při dobré (exaktní) znalosti deformace obrobku před upnutím, obrobení a uvolnění (zjistitelné experimentálně nebo metodou konečných prvků) je možné elektronicky minimalizovat i tyto technologické vlivy. Samostatnou problematikou kompenzací, řekněme až disciplínou, jsou kompenzace tepelných deformací rámu stroje a vřetene [40].

Je však nutné poznamenat, že kompenzování je až krajní možnost. Je nutné mít stroj od výrobce v [9]:

- dostatečné tuhosti statické, dynamické, teplotní;
- kondici po mechanické stránce (geometrická přesnost a přesnost polohování);
- dobré odolnosti vůči vnějším rušivým vlivům.

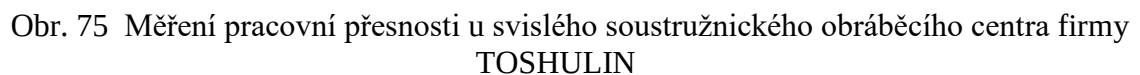
Z pohledu základní funkce obráběcího stroje zajímá uživatele jeho výrobnost a pracovní přesnost. Vlivy způsobující pracovní nepřesnost procesu obrábění můžeme rozdělit na:

1. geometrické (například vlivem nepřesnosti výroby dílců a montáže stroje, kontaktní tuhosti, opotřebení);
2. teplotní (například oteplení vřetene a jeho délková roztažnost, uložení stolu, teplotní prodloužení rámu, úhlové deformace rámu, naklonění rámu);
3. způsob upínání obrobku (například vlivy nepřesného upnutí, deformace obrobku či palet včetně obrobku při upnutí, poddajnosti kontaktních ploch i celého obrobku);
4. řezný proces (například řezné síly, ohřev nástroje, deformace nástroje);
5. řízení (například nepřesnost interpolace, odměřování, u přímých pohonů).

Souhrnně první až třetí bod představuje oblast zájmu volumetrické přesnosti. Základem úspěšné kompenzace je vždy měření reálného stavu stroje, zejména jeho geometrie, tedy jak je vyroben (přesnost jednotlivých dílců, jejich montáž ve skupině a stroj jako celek), za pohybu os (např. sledování kvality či chyby kruhové interpolace) a za provozu – pracovní přesnost, a hlavně za určitého a okamžitého tepelného stavu. Na základě nasbíraných dat je stanovena kompenzační křivka, která je pak zanesena do řídicího systému. Ten pak v součinnosti s technologickým programem dokáže korigovat pohyby jednotlivých os tak, aby bylo dosaženo nejlepšího možného výsledku. Je třeba si uvědomit, že kompenzace (kompenzační křivky) jsou stanoveny pro určitý stav stroje. Proto je třeba nalézt optimální podmínky [9].

Uvedenou volumetrickou přesností se budeme pro predikování vlastností obrobkových kinematických dvojic u CNC obráběcích strojů dále zabývat.

Pracovní přesnost CNC obráběcího stroje zkoušenou u výrobce na zkušebních kusech ukazuje obr 75.



Jak je z předešlého textu patrné, budeme se dále v kap. 6.2, kde je prezentována případová studie, zabývat volumetrickou přesností, a to na základě nastíněné metodiky (kap.5).

6.2 PĚTIOSE OBRÁBĚCÍ CENTRUM DMU 75 MONOBLOCK®

Pětiosé obráběcí centrum DMU 75 monoBlock (obr. 76) 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 [11].



Obr. 76 DMU 75 monoBlock [DMG MORI]

Technické parametry stroje jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 11: Parametry stroje DMU 75 monoBlock

Rozjezd os [mm]	750 / 650 / 560
Velikost stolu [mm]	Pr. 650
Maximum zatížení [kg]	600
Maximální rozměry obrobku [mm]	Pr. 840 x 500
Maximální posuvová rychlost X/ Y/ Z [m/min]	40 / 40 / 40
Maximální otáčky vřetene [rpm]	20 000
Řídicí systém	Heidenhain TNC 640

Měření se řídí obecnou metodikou z kap. 5.2.

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, tyto hodnoty jsou znázorněny v Tab.12. Řídicí systém Heidenhain TNC 640 umožňuje mít tyto kompenzace zapnuté při možné kompenzaci volumetrické přesnosti, a proto byly tyto ponechány aktivované.

Tab. 12: Výsledky přesností polohování os dle technické dokumentace stroje

Osa	Chyba polohování – P
X	3.621 μm
Y	2.591 μm
Z	4.533 μm
A	2.6 arcsec
C	3.0 arcsec

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.

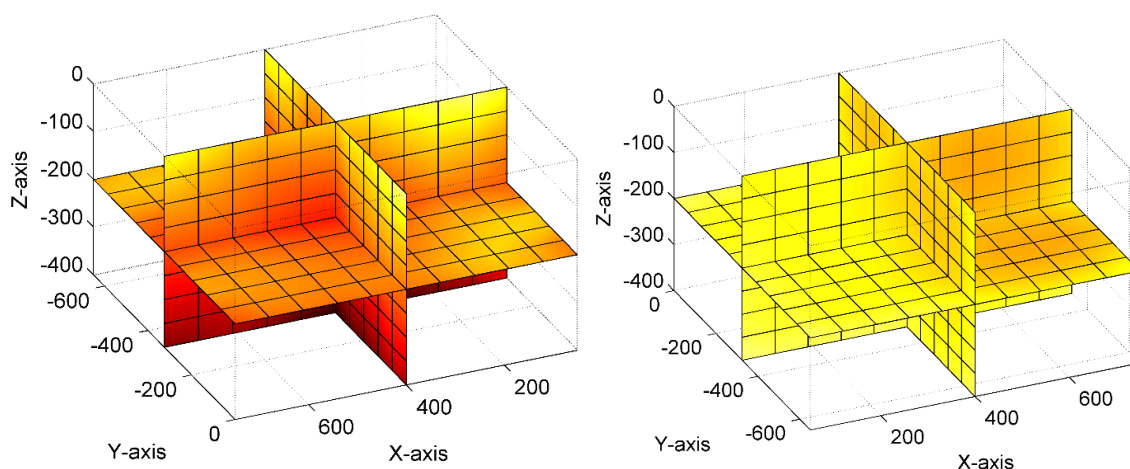
Bylo rozhodnuto, že před měřením volumetrické přesnosti rotačních os bude změřena a kompenzována volumetrická přesnost lineárních os. Po tomto měření bude následovat měření a kompenzace rotační osy C a poté rotační osy A.

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).

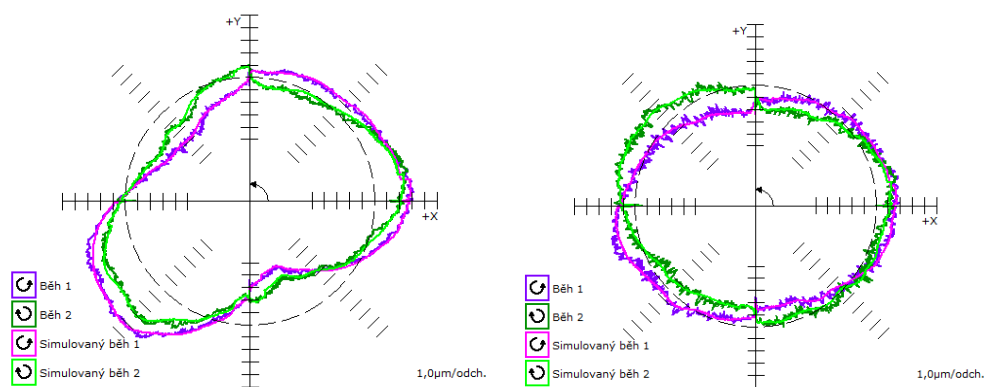
E. Vyhodnocení a analýza naměřených dat.

Měření a kompenzace volumetrické přesnosti lineárních os stroje je vidět na obr. 77. Po kompenzaci byl pracovní prostor zlepšen o cca. 60 %.



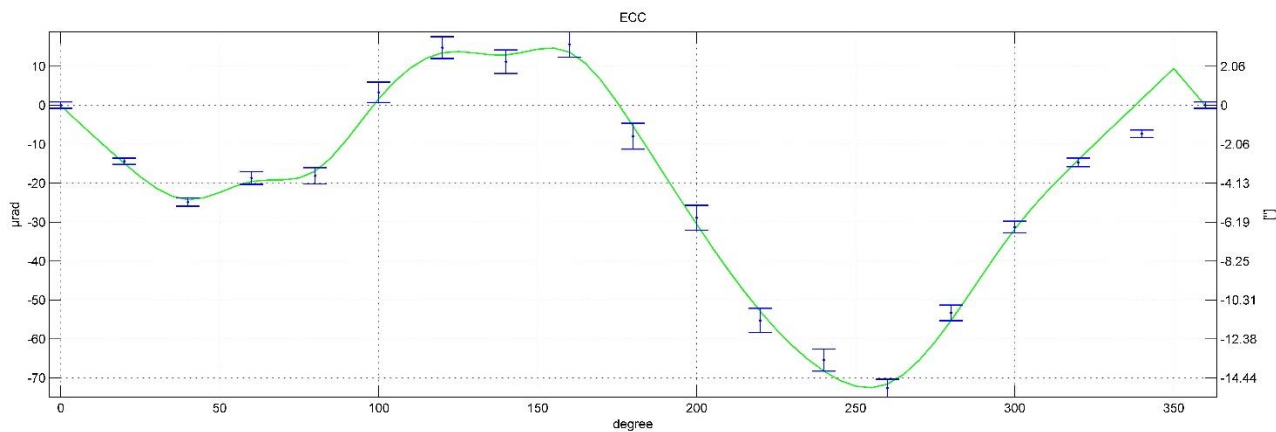
Obr. 77 Výsledky měření volumetrické přesnosti lineárních os před a po kompenzaci

Před verifikačním měřením volumetrické přesnosti byl stroj změřen zařízením DBB k ověření úspěšné aktivace volumetrické kompenzace. Z obr. 78 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.

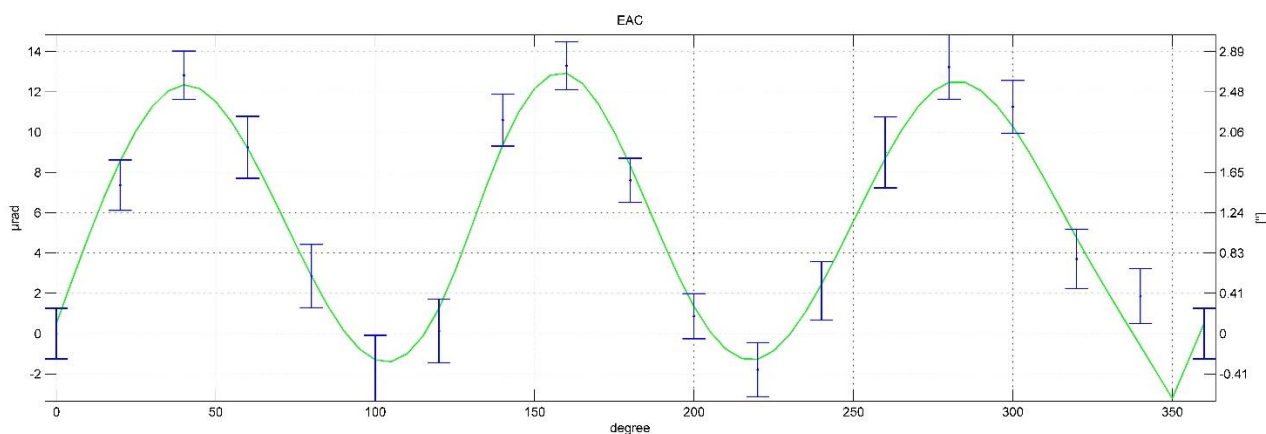


Obr. 78 Přesnost kruhové interpolace v rovině XY před a po volumetrické kompenzaci

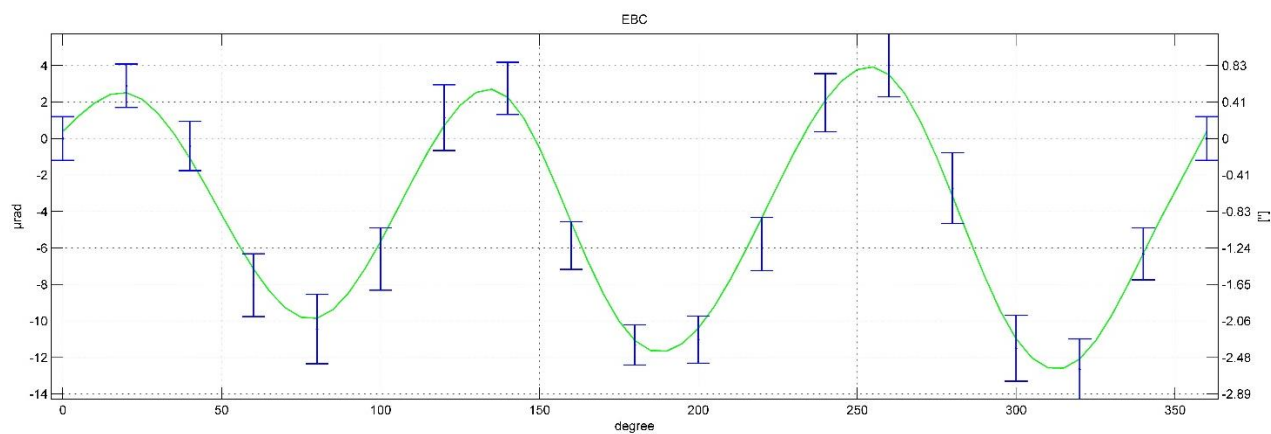
Po kompenzaci volumetrické přesnosti lineárních os se nejdříve musí měřit ta rotační osa, která je první v kinematickém řetězci od obrobku k nástroji, tedy osa C. Tato osa byla změřena s následujícími výsledky.



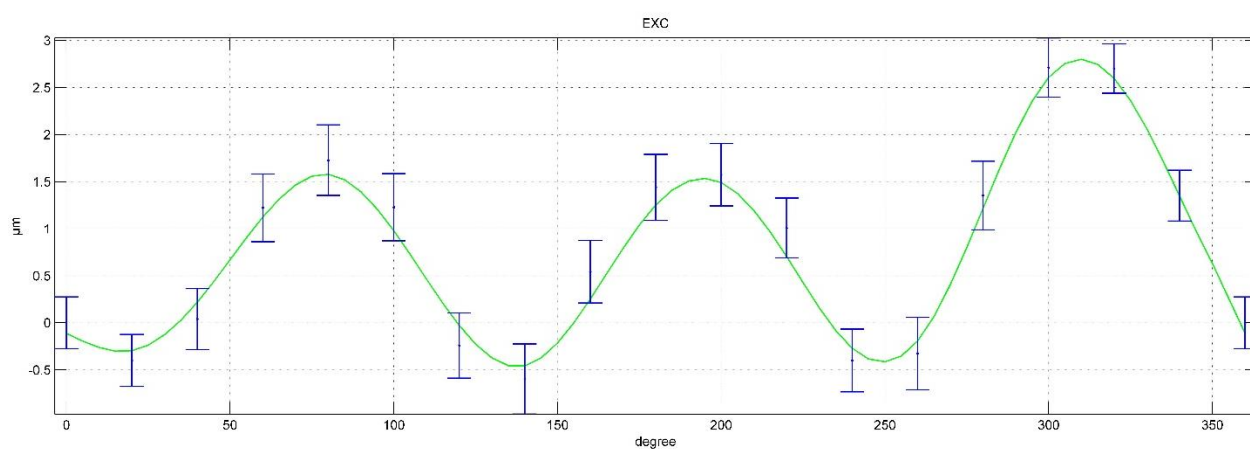
Obr. 79 Chyba ECC osy C



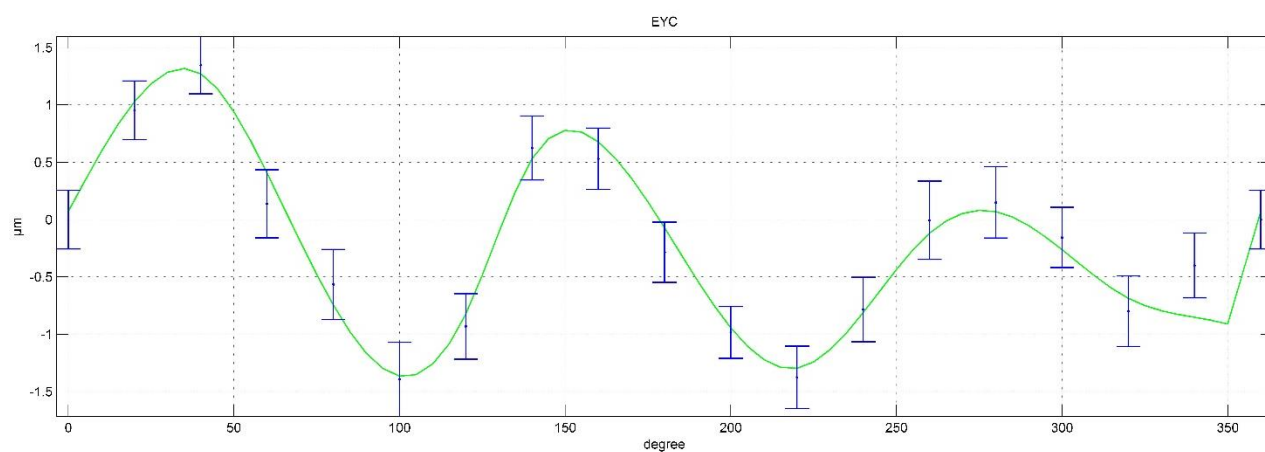
Obr. 80 Chyba EAC osy C



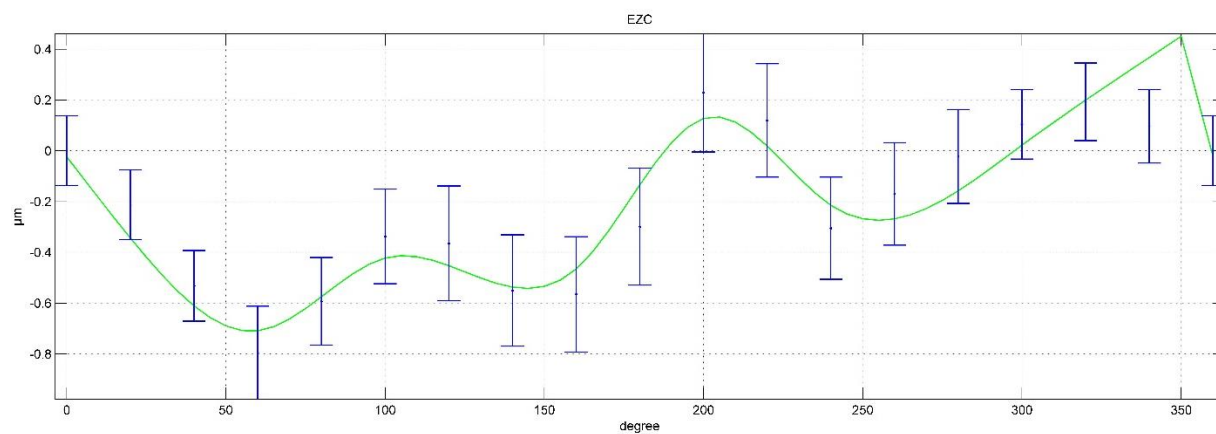
Obr. 81 Chyba EBC osy C



Obr. 82 Chyba EXC osy C



Obr. 83 Chyba EYC osy C

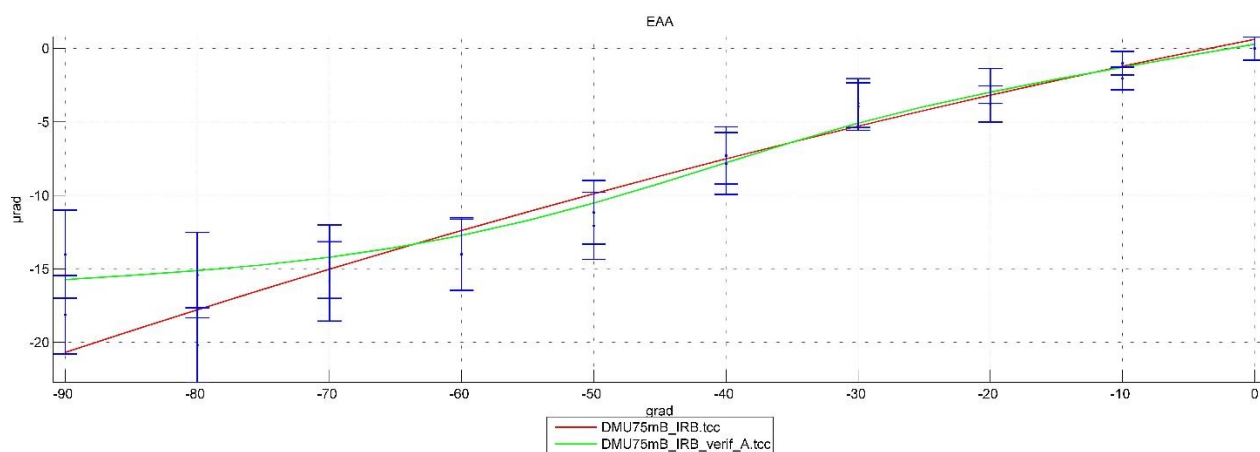


Obr. 84 Chyba EZC osy C

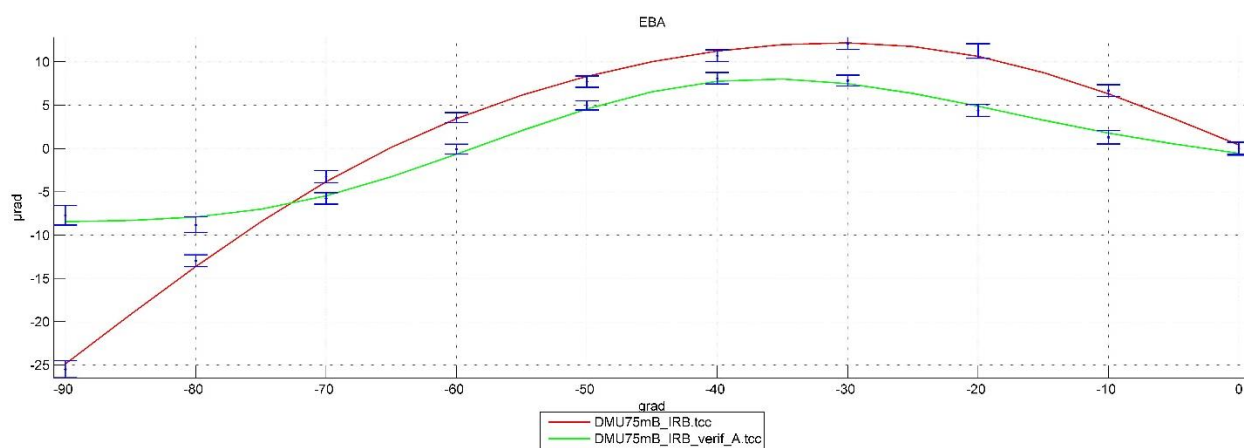


Obr. 85 Ukázka měření osy C zařízením Laser Tracer na stroji DMU

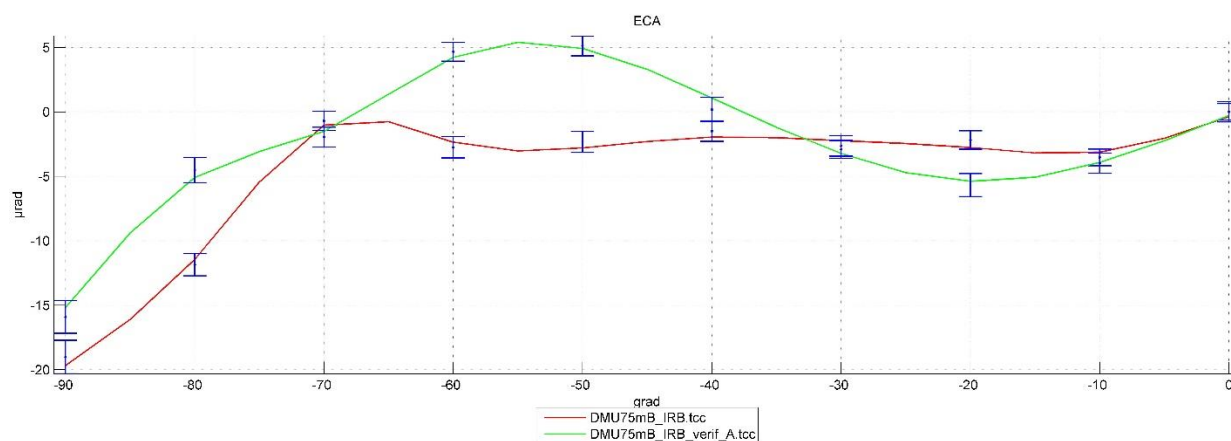
Po změření osy C se měřila a kompenzovala osa A s následujícími výsledky, kde červená barva znamená chybu při kalibračním měření a zelená při verifikačním.



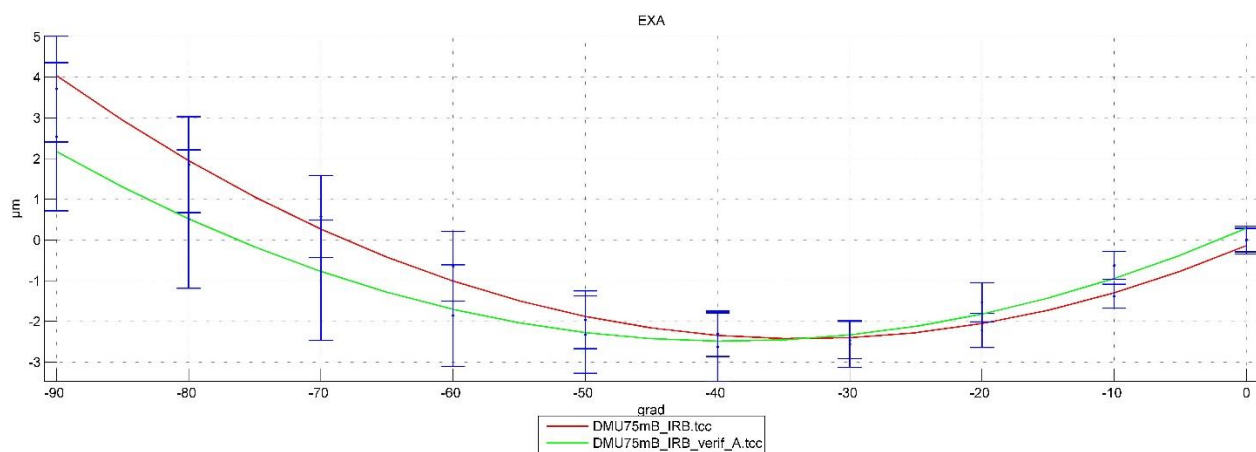
Obr. 86 Chyba EAA osy A



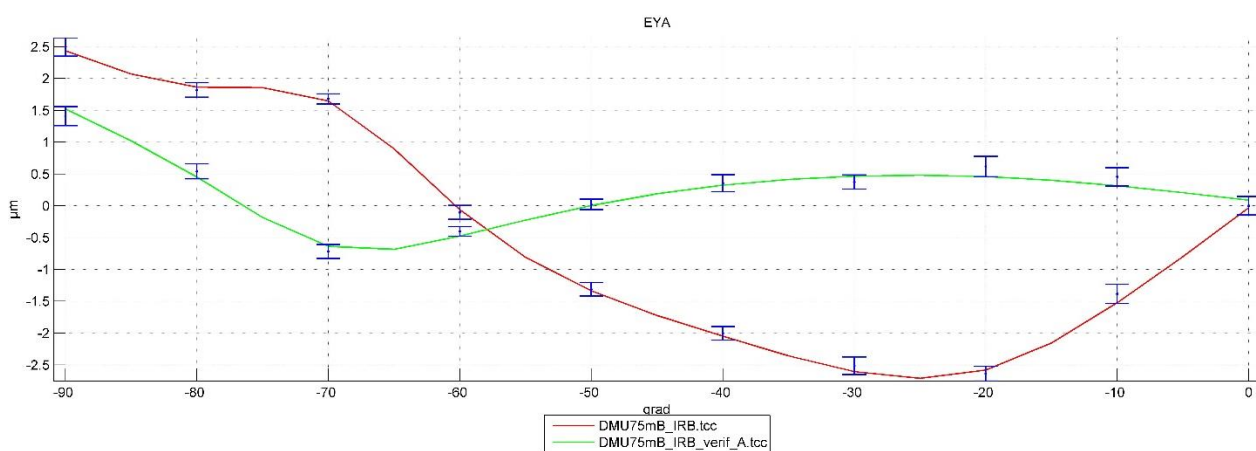
Obr. 87 Chyba EBA osy A



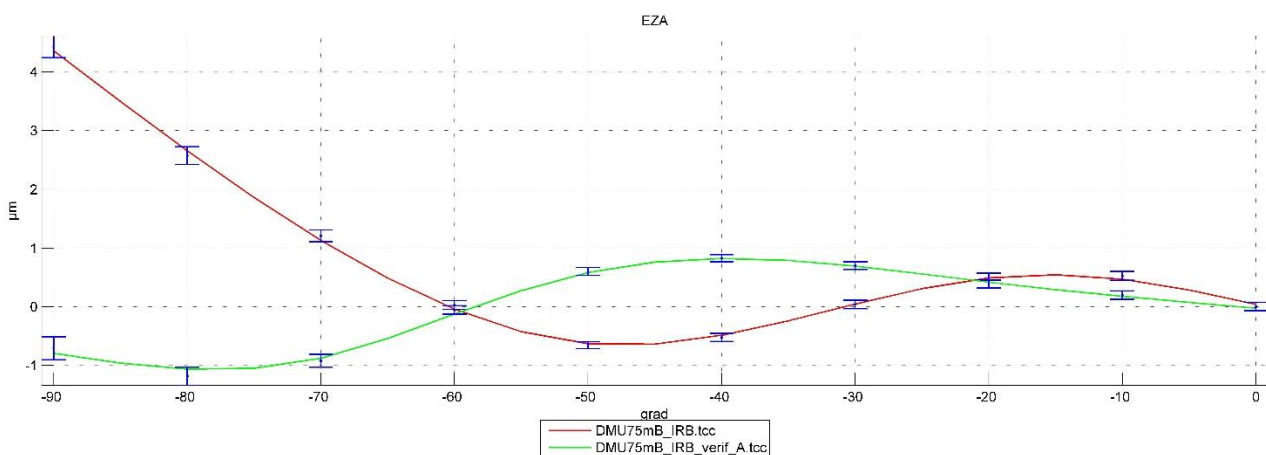
Obr. 88 Chyba ECA osy A



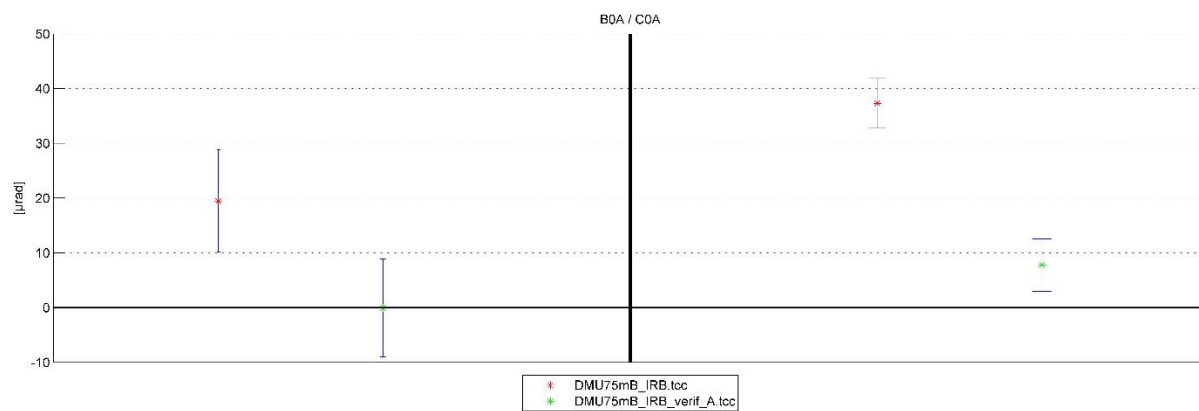
Obr. 89 Chyba EXA osy A



Obr. 90 Chyba EYA osy A



Obr. 91 Chyba EZA osy A



Obr. 92 Chyba B0A a C0A osy A



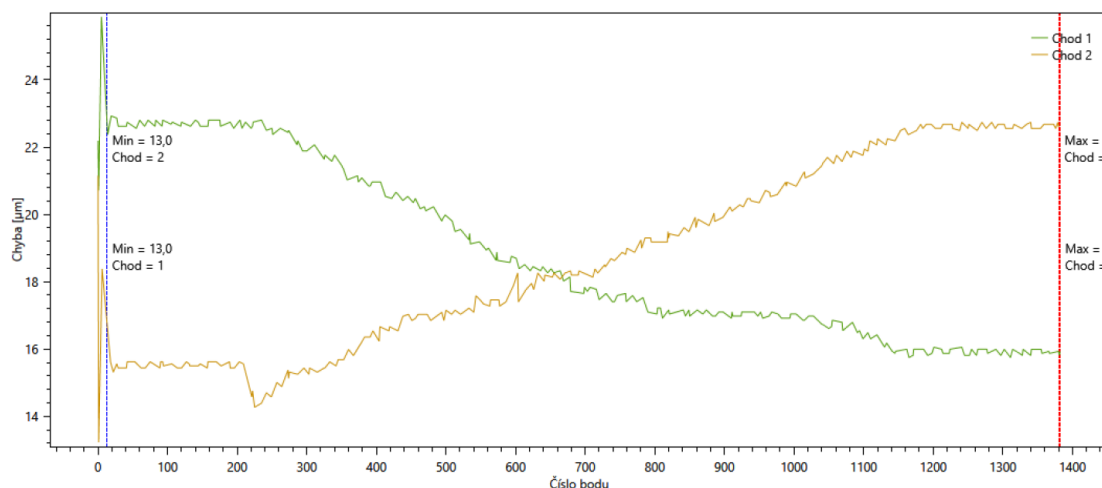
Obr. 93 Ukázka měření osy A zařízením Laser Tracer na stroji DMU

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.

V následující části jsou obě rotační osy změřeny různými metodami, i když měření volumetrické přesnosti je nejefektivnější, ale také časově nejnáročnější metodou. Měření bylo provedeno pomocí zařízení DBB (Trace), obrobkovou sondou (KinematicOpt) a rotary analyzerem. Neshoda výsledků mezi Laser Tracerem a těmito měřeními je způsobena tím, že měření probíhalo za podmínek reprodukovatelnosti a ne opakovatelnosti. Změněné podmínky byly následující:

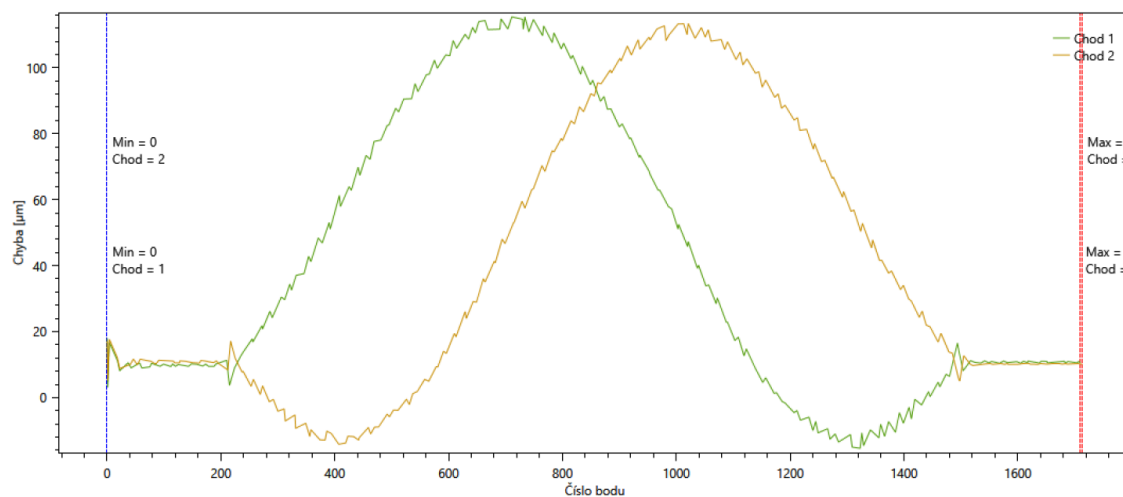
- jiný den (měsíc) měření;
- jiná teplota stroje a okolí stroje;
- jiný operátor zařízení.

Výsledky měření pomocí Ballbar Tracer rotačních os A, C byly následující.



Ballbar - Vlastnosti analýzy	
Název	Hodnota
Max	22,9 μm
Min	14,3 μm
Difference	8,7 μm

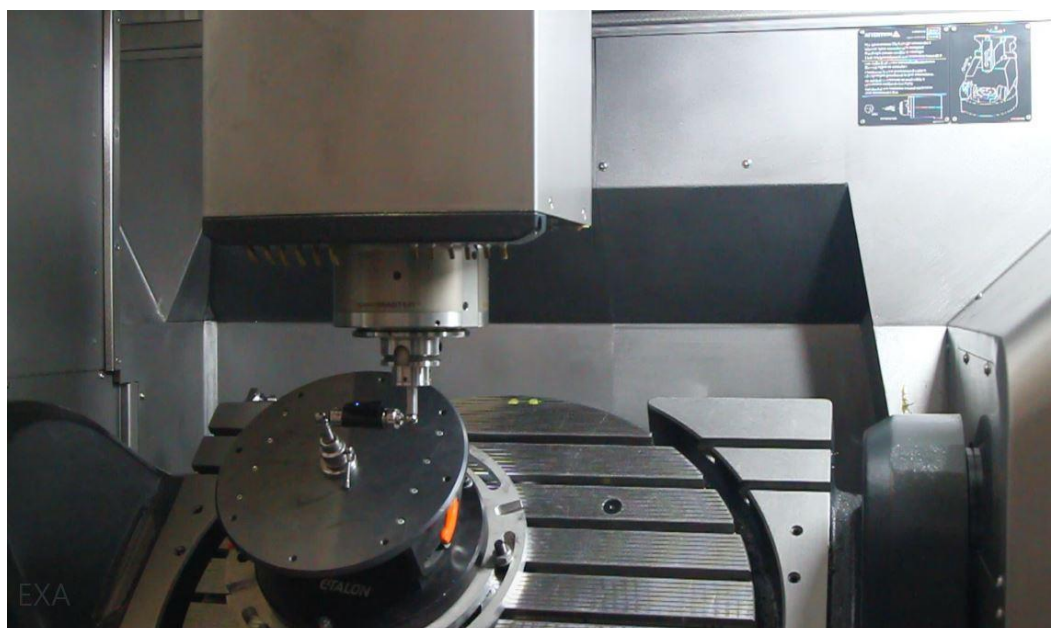
Obr. 94 Chyba EXA osy A pomocí Ballbar Trace



Ballbar - Vlastnosti analýzy	
Název	Hodnota
Max	115,4 µm
Min	-15,4 µm
Difference	130,8 µm

Obr. 95 Chyba EXC osy C pomocí Ballbar Trace

Na výsledcích z měření pomocí BallBar Trace si lze všimnout, že chod dopředu (zelená) a dozadu (oranžová) není stejný. Po analýze výsledků bylo zjištěno, že to není chybou vůle (backlash), protože výsledky jsou zrcadlově otočené. Bylo to způsobeno chybou v SW společnosti Renishaw, která na základě podnětu vydala aktualizaci.



Obr. 96 Ukázka měření chyby EXA pomocí Ballbar Trace na stroji DMU

Výsledky měření pomocí dotykové sondy, kalibrované kuličky a cyklu 3D quickSET jsou následující.

Zaznam mereni: Cyklus sondy 451: Mereni kinematiky

Datum: 18-05-2018
Cas: 10:37:25
Nastroj: 100.0 'SONDA'

Zapis preset
Radek tabulky 8

	Zmerena hodnota	Nominalni hodnota	Výsledek
Referencni osa	0.2466	0.0000	-1.4825
Vedlejsi osa	178.1752	0.0000	10.1121
Osa nastroje	-0.0105	0.0000	218.5770

Aktivni kinematika: K_XYZ_TAC
Pocatecni uhel: -180.0000
Koncovy uhel: 180.0000
Uhel nabehu?: 0.0000
Pocet bodu mereni: 9
Polomer mericoho kruhu [mm]: 10.2199
Mrtvy chod: 0.00000

Poloha osy C	predtim	potom
X	409.9850	409.9850
Y	-325.0170	-325.0170
Z	-680.5690	-680.5690

Výsledek	Namerena odchylka	Dosazitelna odchylka
Standardni odchylka /mm	0.0057	0.0020
Maximalni odchylka /mm	0.0082	0.0029
V poloze	-180.0000	100.0000
Odchylka X0C /mm	-0.0036	-0.0036
Odchylka Y0C /mm	-0.0013	-0.0013
Odchylka A0C /°	0.00151	
Odchylka B0C /°	-0.00159	
Odchylka C0C /°	0.00000	
Polohova odchylka ECC /°	0.00598	-0.00473

Obr. 97 Výsledky měření osy C pomocí cyklu 3D QuickSET

Zaznam mereni: Cyklus sondy 451: Mereni kinematiky

Datum: 18-05-2018
Cas: 10:10:22
Nastroj: 100.0 'SONDA'

Zapis preset
Radek tabulky 8

	Zmerena hodnota	Nominalni hodnota	Výsledek
Referencni osa	-1.6651	0.0000	-1.4656
Vedlejsi osa	-74.8183	0.0000	91.5954
Osa nastroje	-0.0220	0.0000	218.6055

Aktivni kinematika: K_XYZ_TAC
Pocatecni uhel: -90.0000
Koncovy uhel: 5.0000
Uhel nabehu?: 0.0000
Pocet bodu mereni: 4
Polomer mericoho kruhu [mm]: 150.2801
Mrtvy chod: 0.00000

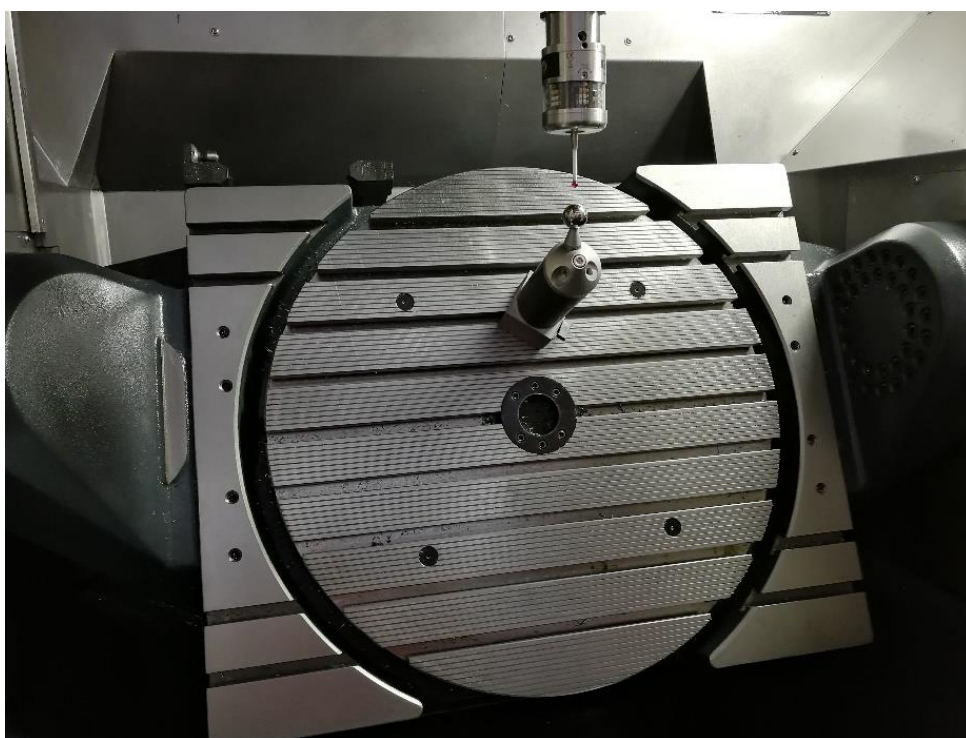
Poloha osy A	predtim	potom
X	409.9850	409.9850
Y	-255.0010	-255.0010
Z	-610.6420	-610.6420

Výsledek	Namerena odchylka	Dosazitelna odchylka
Standardni odchylka /mm	0.0254	0.0050
Maximalni odchylka /mm	0.0394	0.0064
V poloze	-90.0000	-58.3333
Odchylka Y0A /mm	-0.0011	-0.0011
Odchylka Z0A /mm	-0.0279	-0.0279
Odchylka A0A /°	0.00000	
Odchylka B0A /°	0.00167	
Odchylka C0A /°	0.00271	
Polohova odchylka EAA /°	-0.00631	-0.00518

Obr. 98 Výsledky měření osy A pomocí cyklu 3D QuickSET

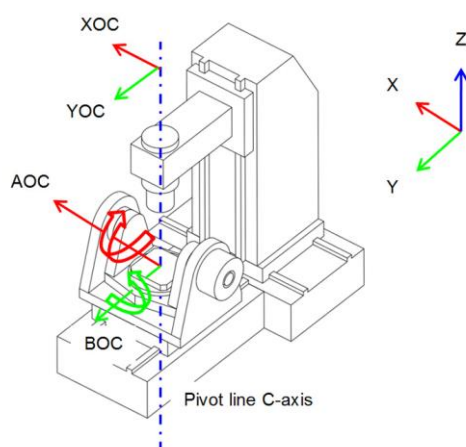


Obr. 99 Ukázka měření osy C pomocí cyklu 3D QuickSET na stroji DMU



Obr. 100 Ukázka měření osy A pomocí cyklu 3D QuickSET na stroji DMU

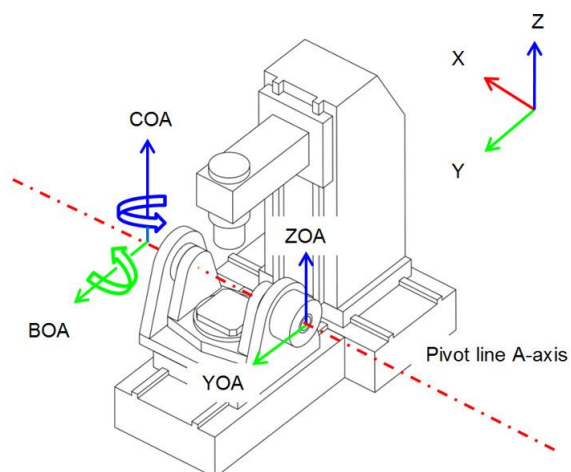
Výsledky měření pomocí zařízení rotary analyzer jsou následující.



BK2 test results (C-axis)

Pivot line position	Value
XOC	0,0068 mm
YOC	0,0052 mm
Squareness pivot line	Value
BOC	-0,0003 °
AOC	-0,0005 °

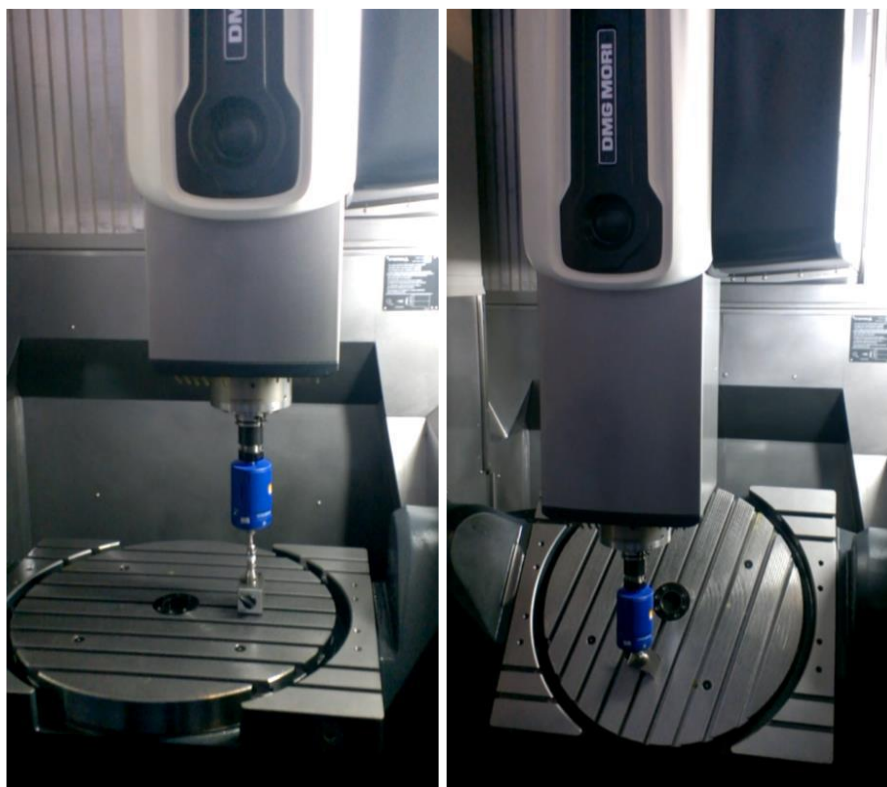
Obr. 101 Výsledek měření osy C zařízením rotary analyzer



BK1 test results (A-axis)

Pivot line position	Value
YOA	0,0083 mm
ZOA	-0,0079 mm
Squareness pivot line	Value
COA	0,0005 °
BOA	-0,0009 °

Obr. 102 Výsledek měření osy A zařízením rotary analyzer



Obr. 103 Ukázka měření osy C a A zařízením rotary analyzer na stroji DMU

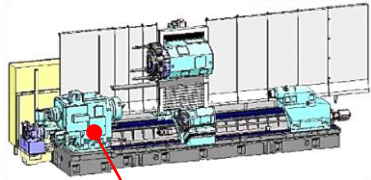
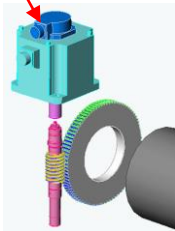
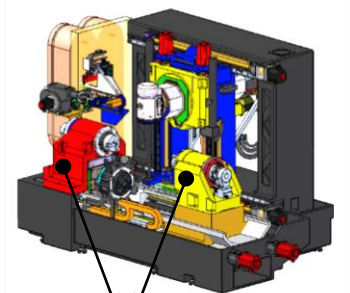
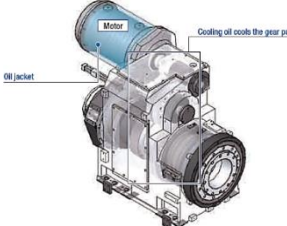
F. Predikce vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic CNC obráběcího stroje

Na základě měření případové studie jsou v následující kapitole (6.3) tabulky predikcí volumetrické přesnosti pro různé kinematiky strojů.

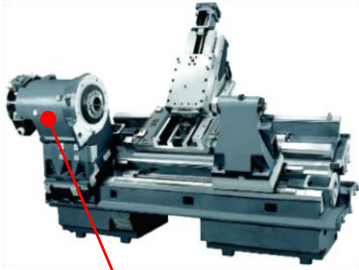
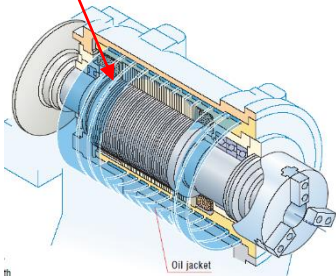
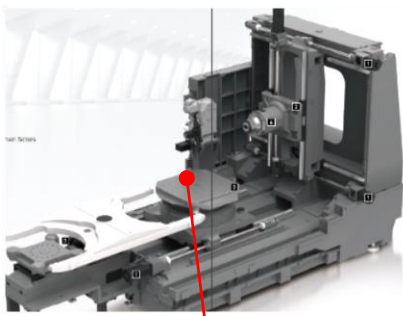
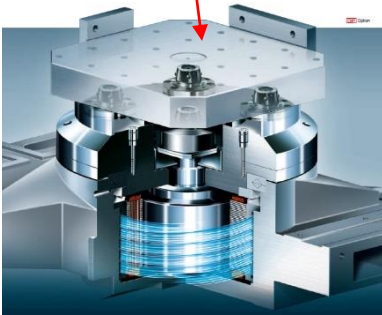
6.3 PREDIKCE VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ ROTAČNÍCH KINEMATICKÝCH DVOJIC CNC OBRÁBĚCÍCH STROJŮ PRO OBROBEK

Na základě předchozí případové studie (kap.6.2) 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.

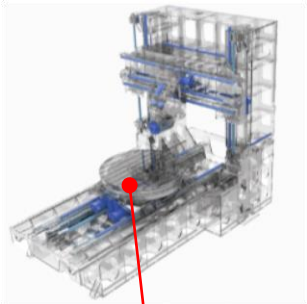
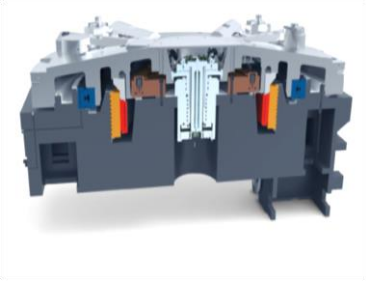
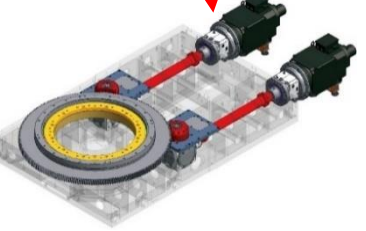
Tab. 13: Predikce volumetrické přesnosti u čtyřosých CNC obráběcích strojů s rotačními osami pro obrobek

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 %

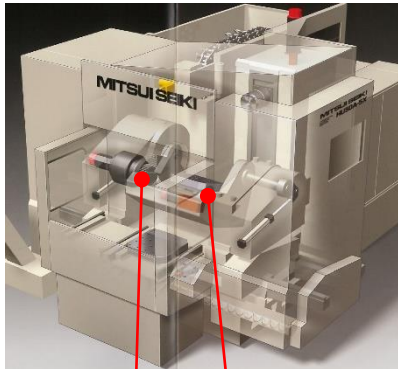
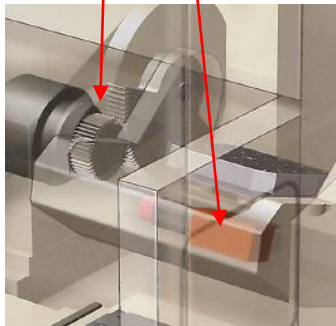
Tab. 13: Predikce volumetrické přesnosti u čtyřosých CNC obráběcích strojů s rotačními osami pro obrobek – pokračování

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>Elektrické</i>	• průměr obrobku: 420 mm • délka obrobku: 2123 mm • hmotnost obrobku: 6000 kg • minimální indexovaná jednotka dělení: $0,001^0$ vodorovné soustružnické obráběcí centrum NL 3000 DMG MORI	  lineární osy: valivé profilové vedení	+ 60 %
<i>Elektrické</i>	• průměr obrobku: 2000 mm • výška obrobku: 1600 mm • hmotnost obrobku: 5000 kg • minimální indexovaná jednotka dělení: $0,001^0$ vodorovné frézovací obráběcí centrum NHX10000 DCG DMG MORI	  lineární osy: valivé profilové vedení, Box in Box konstrukce	+ 60 %

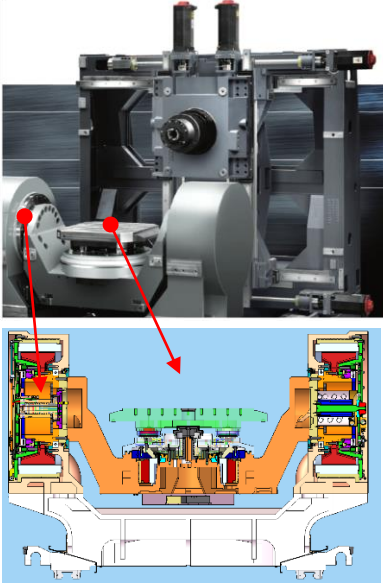
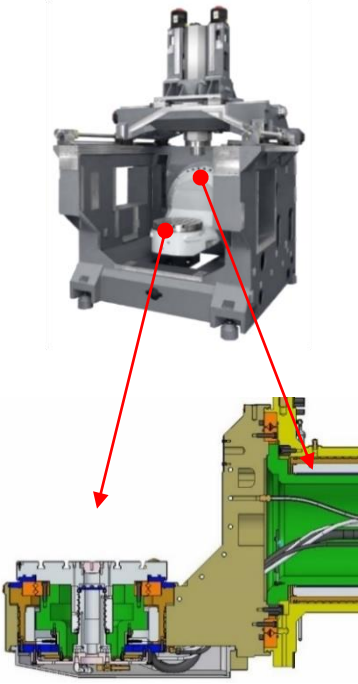
Tab. 13: Predikce volumetrické přesnosti u čtyřosých CNC obráběcích strojů s rotačními osami pro obrobek – dokončení

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>Elektrické</i>	• průměr obrobku: 3900 mm • výška obrobku: 1960 mm • hmotnost obrobku: 7000 kg • minimální indexovaná jednotka dělení: 0,001⁰ portálové obráběcí centrum DMU/DMC 340 FD DMG MORI	  lineární osy: valivé profilové vedení	+ 60 %
<i>Elektromechanické</i>	• průměr obrobku: 1070 mm • výška obrobku: 6600 mm • hmotnost obrobku: 6000 kg • přesnost osy C: 10“ svislé soustružnické obráběcí centrum TOSHULIN	  lineární osy: kluzné	+ 40 %

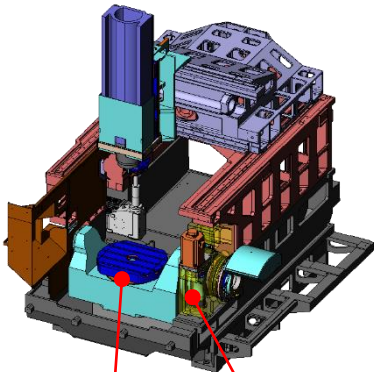
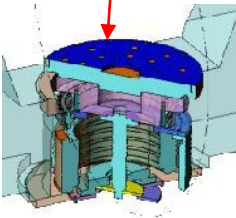
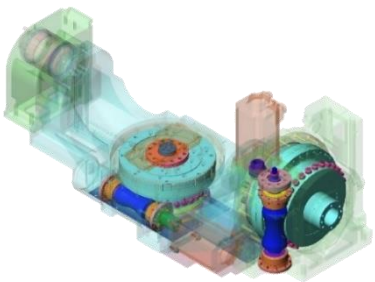
Tab. 14: Predikce volumetrické přesnosti u pětiosých CNC obráběcích strojů s rotačními osami pro obrobek

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>Elektromechanické</i>	Mitsui Seiki • průměr obrobku: 750 mm • výška obrobku: 700 mm • hmotnost obrobku: 650 kg • přesnost osy A: $\pm 3''$ • přesnost osy C: $\pm 3''$ vodorovné frézovací obráběcí centrum HU 50 AX	 	+ 25 %
	Mitsui Seiki • průměr obrobku: 500 mm • výška obrobku: 350 mm • hmotnost obrobku: 100 kg • přesnost osy A: $\pm 3''$ • přesnost osy C: $\pm 3''$ vodorovné frézovací obráběcí centrum HU 50 A	  lineární osy: kluzné	+ 20 %

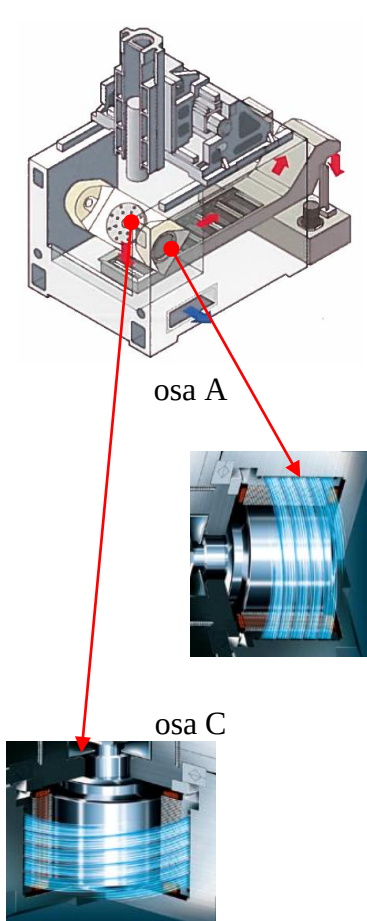
Tab. 14: Predikce volumetrické přesnosti u pětiosých CNC obráběcích strojů s rotačními osami pro obrobek – pokračování

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 %

Tab. 14: Predikce volumetrické přesnosti u pětiosých CNC obráběcích strojů s rotačními osami pro obrobek – pokračování

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>Elektromechanické</i>	• průměr obrobku: 730 mm • výška obrobku: 500 mm • hmotnost obrobku: 500 kg • přesnost osy A: 10“ • přesnost osy C: 10“ svislé frézovací obráběcí centrum VRX 630 T Yamazaki Mazak	  osa A	+ 50 %
	• průměr obrobku: 1000 mm • výška obrobku: 500 mm • hmotnost obrobku: 500 kg • přesnost osy A: 14“ • přesnost osy C: 14“ svislé frézovací obráběcí centrum VRX 7302 Yamazaki Mazak	 osa C  osa A + C lineární osy: valivé profilové vedení	+ 50 %

Tab. 14: Predikce volumetrické přesnosti u pětiosých CNC obráběcích strojů s rotačními osami pro obrobek – dokončení

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: 950 mm • výška obrobku: 650 mm • hmotnost obrobku: 500 kg • přesnost osy A: $\pm 6''$ • přesnost osy C: $\pm 4''$ vodorovné frézovací obráběcí centrum Vretex 750 -5X Mitsui Seiki	 osa A osa C lineární osy: valivé profilové vedení	+ 25 %

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.

7 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 (kap.4) při tvorbě této metodiky (kap.5)
- praktické, kdy na základě případové studie na určitém CNC obráběcí stroji, došlo k predikci vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic pro obrobek.

Výše zmíněná aplikace systémového přístupu popsala to, co mnoha aplikačním pracovníkům probíhá v hlavě a je jejich tacitní, nebo-li skrytou znalostí. S tím bývá v mnoha firmách velký problém, protože někteří pracovníci mají tendenci prokazovat svoji nepostradatelnost. To do značné míry odstraňuje veřejně dostupná teorie systémového přístupu, která dává obecný a komplexní návod na to, jak postupovat.

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 – viz kap.6. 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 (kap.6).

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 GIS (Stavba výrobních strojů I) a GTS (Testování obráběcích strojů), ale také při vlastním měření na strojích v dílně Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky.

8 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. Metodika brala v úvahu dostupnost vhodné měřicí techniky (kap. 2.4 a kap.5.2), popis konstrukčního provedení rotačních kinematických dvojic (kap.2.2).

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.

Predikce chování byla podrobně popsána v kap. 6. Z předložených případových studií 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.

9 ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ

9.1 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 universální prostředek při správné aplikaci je mohutným nástrojem pro technické obory, které se zabývají konstruováním, zejména pak konstruováním výrobních strojů nebo robotů.

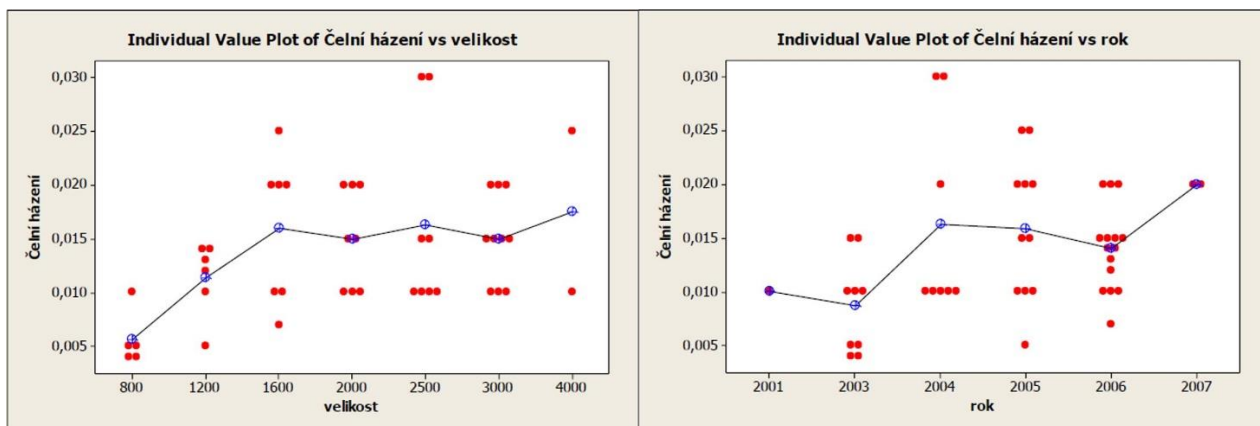
Na základě této zkušenosti doporučuji aplikovat do podvědomí studentů tento vědecký nástroj pro zpracovávání semestrálních a zejména pak do diplomových a dizertačních prací. Pro další vědecký rozvoj na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky, FSI, VUT v Brně doporučuji navázat na téma mé dizertační 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.

9.2 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 (kap.6), tak lze předpokládat, že se navrhovaný stroj bude chovat podobně. Výrobce CNC obráběcích strojů tak může předpokládat, že pokud budou dodrženy zásady posoupnosti 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 [12] – obr. 104.



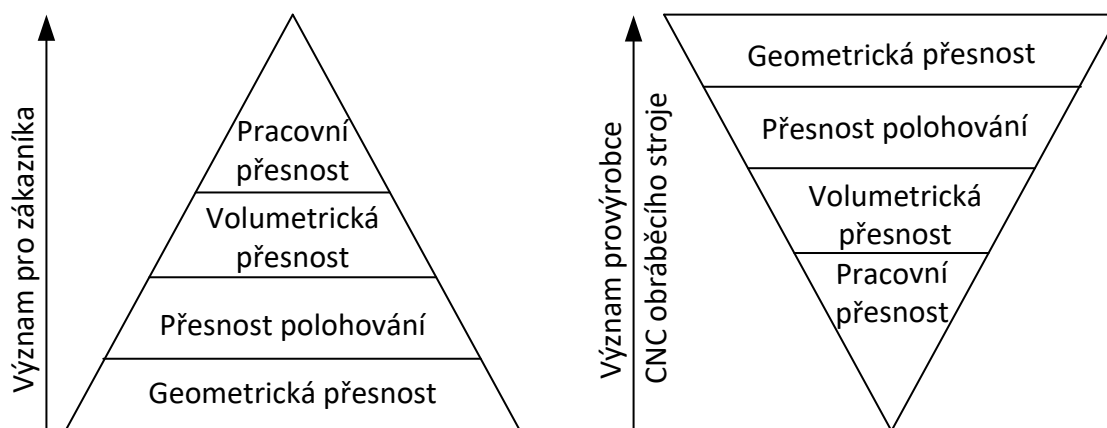
Obr. 104 Čelní a obvodové házení desky stolu svislého soustruhu v závislosti na velikosti a roku výroby [12]

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 uvedené na obr. 104. 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 základním 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 uživatelé 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. 105).



Obr. 105 Chápání různých typů přesnosti u uživatele 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.

10 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, Jiří a kol. *Konstrukce CNC obráběcích strojů IV*. B.m.: MM publishing, s.r.o., 2018. ISBN 978-80-906310-8-3.
- [3] MAREK, Tomáš a Jiří MAREK. *Mít sondu nestačí*. Brno: Renishaw s.r.o., 2017. ISBN 978-80-87017-20-3.
- [4] MAZAK. *Process: 5 - axis* [online]. [vid. 2018-07-10]. Dostupné z: <https://www.mazakusa.com/machines/process/5-axis/>
- [5] 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
- [6] HOLUB, Michal a kol. *GTS - Testování obráběcích strojů, Podklady k výuce*. B.m.: VUT Brno – UVSSR, 2016.
- [7] DEMEČ, Peter. *Presnosť obrábacích strojiv a jej matematické modelovanie*. B.m.: Elfa s.r.o, 2001. ISBN 80-7099-620-X.
- [8] PERNÍKÁŘ, Jiří. *Technická měření*. B.m.: Brno: VUT Brno – FSI, 2002.
- [9] MAREK, Jiří. *Stavba CNC obráběcích strojů - souvislosti a fakta*. B.m.: Grumant s.r.o., 2017.
- [10] *TNI 01 0115 - Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)*. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2009.
- [11] HOLUB, Michal a kol. *Metodický postup zavádění volumetrických kompenzací 5ti osých obráběcích center s kinematikou „BK“*. 2018.
- [12] HOLUB, Michal. *Vliv GEOMETRICKÉ PŘESNOSTI VYBRANÝCH OBRÁBĚCÍCH CENTER NA POŽADOVANÉ VLASTNOSTI VÝROBKU*. B.m., 2011. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] JANKOVÝCH, Róbert. *Statistické nástroje v metrologii, Podklady k výuce*. B.m.: VUT Brno – UVSSR, nedatováno.
- [14] VAVŘÍK, Ivan. *Kontrola a měření výrobních strojů*. Brno: VUT Brno – FSI, 1985.
- [15] DVOŘÁK, D. *Úvod do metrologie, učební text*. Ostrava: Ostravská univerzita, 2012.
- [16] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. B.m.: VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, 2004.
- [17] *ČSN ISO 230-1 Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek*. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2014.
- [18] WECK, Manfred a Christian BRECHER. *Werkzeugmaschinen 5 Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität*. nedatováno. ISBN 9783540225058.
- [19] HEIDENHAIN. *Dotykové sondy pro obráběcí stroje* [online]. 2015 [vid. 2019-01-22]. Dostupné z: https://www.heidenhain.cz/cs_CZ/produkty/dotykové-sondy/
- [20] UDDIN, M Sharif, Soichi IBARAKI, Atsushi MATSUBARA a Tetsuya MATSUSHITA. Prediction and compensation of machining geometric errors of five-axis machining centers with kinematic errors [online]. 2009, **33**, 194–201. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2008.06.001
- [21] LIU, Yang a Min WAN. Identification of position independent geometric errors of rotary axes for five-axis machine tools with structural restrictions. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* [online]. 2018, **53**(March), 45–57. ISSN 0736-5845. Dostupné z: doi:10.1016/j.rcim.2018.03.010

- [22] LEE, Kwang-il a Seung-han YANG. Measurement and verification of position-independent geometric errors of a five-axis machine tool using a double ball-bar. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2013, **70**, 45–52. ISSN 0890-6955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2013.03.010
- [23] CHEN, Jian-xiong, Shu-wen LIN a Bing-wei HE. Geometric error measurement and identification for rotary table of multi-axis machine tool using double ballbar. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2014, **77**, 47–55. ISSN 0890-6955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2013.10.004
- [24] LIU, Yang, Min WAN, Qun-bao XIAO a Wei-hong ZHANG. Identification and compensation of geometric errors of rotary axes in five-axis machine tools through constructing equivalent rotary axis (ERA) [online]. 2019, **152**(October 2018), 211–227. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2018.12.050
- [25] HE, Zhenya, Jianzhong FU, Liangchi ZHANG a Xinhua YAO. A new error measurement method to identify all six error parameters of a rotational axis of a machine tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2015, **88**, 1–8. ISSN 0890-6955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2014.07.009
- [26] SCHWENKE, H, R SCHMITT, P JATZKOWSKI a C WARMANN. On-the-fly calibration of linear and rotary axes of machine tools and CMMs using a tracking interferometer [online]. 2009, **58**, 477–480. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2009.03.007
- [27] PAN, Fangyu, Ming LI a Jian YIN. Error Model and Accuracy Calibration of 5-Axis Machine Tool. 2013, **11**(8).
- [28] WANG, Jindong, Junjie GUO, Guoxiong ZHANG a Bao GUO. The technical method of geometric error measurement for multi-axis NC machine [online]. nedatováno, **045003**. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/23/4/045003
- [29] ZHENJIU, Zhang, Ren MINGJUN a Liu MINGJUN. A Modified Sequential Multilateration Scheme and Its Application in Geometric Error Measurement of Rotary Axis. *Procedia CIRP* [online]. 2015, **27**, 313–317. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2015.04.085
- [30] WANG, Jindong a Junjie GUO. The identification method of the relative position relationship between the rotary and linear axis of multi-axis numerical control machine tool by laser tracker. *Measurement* [online]. 2019, **132**, 369–376. ISSN 0263-2241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2018.09.062
- [31] HONG, Cefu a Soichi IBARAKI. Non-contact R-test with laser displacement sensors for error calibration of five-axis machine tools. *Precision Engineering* [online]. 2013, **37**(1), 159–171. ISSN 0141-6359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2012.07.012
- [32] IBARAKI, Soichi, Chiaki OYAMA a Hisashi OTSUBO. Construction of an error map of rotary axes on a five-axis machining center by static R-test. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2011, **51**(3), 190–200. ISSN 0890-6955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2010.11.011
- [33] FLORUSSEN, G H J a H A M SPAAN. Dynamic R-test for rotary tables on 5-axes machine tools [online]. 2012, **1**, 536–539. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2012.04.095
- [34] IBARAKI, Soichi, Takeyuki IRITANI a Tetsuya MATSUSHITA. Error map construction for rotary axes on five-axis machine tools by on-the-machine measurement using a touch-trigger probe. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2013, **68**, 21–29. ISSN 0890-6955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2013.01.001
- [35] IBARAKI, Soichi, Masahiro SAWADA, Atsushi MATSUBARA a Tetsuya MATSUSHITA. Machining tests to identify kinematic errors on five-axis machine tools. *Precision Engineering* [online]. 2010, **34**(3), 387–398. ISSN 0141-6359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2009.09.007

- [36] ALESSANDRO, Velenosi, Campatelli GIANNI a Scippa ANTONIO. Axis geometrical errors analysis through a performance test to evaluate kinematic error in a five axis tilting-rotary table machine tool. *Precision Engineering* [online]. 2015, **39**, 224–233. ISSN 0141-6359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2014.09.007
- [37] IBARAKI, Soichi, Ibuki YOSHIDA a Tetsushi ASANO. A machining test to identify rotary axis geometric errors on a five-axis machine tool with a swiveling rotary table for turning operations. *Precision Engineering* [online]. 2019, **55**(February 2018), 22–32. ISSN 0141-6359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2018.08.003
- [38] PŘEMYSL, Janíček a Jiří MAREK. *Expertní inženýrství v systémovém pojetí*. B.m.: Grada Publishing, a.s., 2013. ISBN 978-80-247-4127-7.
- [39] CHILDS, James. All accuracies are not the same! *American Machinist*. 1991, 4.
- [40] LUBOMÍR, Novotný. *Elektronické kompenzace v konstrukci CNC OS* [online]. 2013 [vid. 2019-01-28]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/konstrukce-obrabecich-stroju/konstrukce-cnc-obrabecich-stroju-5_20584.html
- [41] PŘEMYSL, Janíček. *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniku: hledání souvislostí*. Brno: Cerm, akademické nakladatelství VUT Brno - FSI, 2008. ISBN 978-80-7204-554-9.

11 SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

HW	hardware
SW	software
CNC	Computer Numeric Control (číslicové řízení)
PLC	Programmable Logic Controller (programovatelný logický automat)
CHM	chyba měření
SCHM	systematická chyba měření
NCHM	náhodná chyba měření
$A(u_a)$	standartní nejistota typu A
$B(u_b)$	standartní nejistota typu B
u_c	kombinovaná standartní nejistota
k_c	koeficient rozšíření
U	rozšířená nejistota
x_i	naměřená hodnota
$\bar{x}$	aritmetický průměr
n	počet měření
$s(\bar{x})$	výběrový průměr
TCP	Tool Centre Point (špička nástroje)
LTc	Laser Tracer
DBB	Double Ballbar
SAE	Spindle Error Analyzer
HTM	Homogenous transformation matrix (homogení transformační matice)

12 VÝKLAD POJMŮ POUŽITÝCH V DIZERTAČNÍ PRÁCI

Algoritmus lze v obecném pojetí vymezit jako posloupnost činností, která vede ke splnění určitého, subjektem vymezeného a příslušnými činnostmi zajišťovaného cíle. Pojmem algoritmus činností se zdůrazňuje vědomé vytváření postupů při řešení určitých tříd úkolů [38].

Dynamická soustava – je to reálně existující objekt Ω , nezávisle z jakého oboru, pro který je charakteristické:

- je strukturovatelný, což znamená, že ho lze dekomponovat na prvky a vazby mezi nimi; to vyjadřuje termín „soustava“,
- prvky soustavy nebo vazby mezi nimi, resp. oboje jsou v čase proměnné, což vystihuje termín „dynamická“.

V oboru techniky existují technické soustavy, za něž jsou považovány strukturované technické objekty. Dynamické soustavy se vyskytují i mimo techniku, tedy v přírodě (eko-soustavy), ve společnosti (socio-soustavy), v biologii atd [41].

Dynamický systém – systém je abstraktní objekt, který subjekt vytváří na reálném objektu (soustavě) Ω . Je tvořen množinou těch veličin a vazeb mezi nimi, které jsou podstatné z hlediska určitého zájmu subjektu o reálný objekt, např. z hlediska problému řešeného na objektu. Tento abstraktní objekt se v teorii systémů označuje jako „*systém podstatných veličin* $\Sigma(\Omega)$ “. V případě, že struktura soustavy, na níž je vytvořen systém, vykazuje „dynamičnost“, tedy časovou závislost, pak systém podstatných veličin je taktéž „dynamický“, což se zkráceně vyjadřuje termínem „*dynamický systém veličin*“ [41].

Pojem **entita** byl vytvořen scholastikou – středověkou školskou filozofií, která se mimo jiné zabývala spory o povaze obecných pojmů a jejich reálnosti. V původním významu entita vyjadřovala něco jsoucího, existujícího. Proto je jejím synonymem pojem „jsoucnost“. V novověku se tento pojem používal velmi řídky, svou renesanci prožil až s nástupem teorie systémů. V současnosti se pojem entita používá v mnohoznačných významech. Zahrnuje reálné objekty (tělesa, soustavy technické, biologické) nebo abstraktní objekty (vědecké a odborné práce, protokoly, posudky, identifikace apod.), dále procesy, problémy, činnosti (analýzy, syntézy, řešení problémů, hodnocení, učení), podstatu něčeho, bytí, prostě vše, co v dané době existuje [41].

Chyba je negativní účinek odchylky (rozdílnosti), tedy rozdílu mezi tím, „co mělo být“, a tím, „co ve skutečnosti bylo“ [41].

Metoda je ucelený soubor pravidel a popis ověřeného postupu, který doporučuje určité technicky a nástroje k řešení určitého úkolu [41].

Metodika je algoritmus metody, tedy postup, jak aplikovat konkrétní metodu při řešení konkrétního úkolu [41].

Metodologie je věda o metodách a metodikách [41].

Měření je proces určování hodnoty určité fyzikální veličiny s využitím principu měření [38].

- Princip měření je teorie fyzikálního jevu, který se využívá pro měření příslušné fyzikální veličiny.
- Měřicí prostředek je technický objekt umožňující realizovat příslušný princip měření.
- Měřicí metoda je způsob, jak měřením určit fyzikální veličinu s využitím principu měření.
- Postup (algoritmus) měření je sled činností použitý k realizaci měření v souladu s měřicí metodou a principem měření.
- Měřená veličina je veličina určená měřením [38].

Objektový chaos je chaos vznikající na objektu. Potenciálně může vzniknout na jakékoli entitě, na níž probíhají dynamické nelineární procesy, které jsou extrémně citlivé na počáteční podmínky (vstupní údaje do algoritmů procesů) [38].

Osa je základní směr, ve kterém se část stroje může pohybovat lineárním nebo rotačním způsobem [1].

Pojmová čistota znamená významově a obsahově správné vymezení pojmů [38].

Predikce je odhad budoucích hodnot skutečného průběhu, předvídání, předpovídání, předpověď, předpoklad.

Přesnost je vlastnost, která se přiřazuje parametrům entit a která vyjadřuje, že příslušný parametr entity má určitou předepsanou hodnotu [38].

Soustava je na určité úrovni rozlišitelnosti strukturovaný reálný nebo abstraktní objekt [41].

Soustava je na určité úrovni rozlišitelnosti strukturovaná reálná nebo abstraktní entita se systémovými vlastnostmi (strukturovanost, vazby na okolí, cílové chování atd.) [38].

Systém je abstraktní objekt, účelově vytvořený ve vědomí lidí ve vztahu k primárnímu objektu, s cílem řešit na tomto objektu konkrétní problém [41].

Systém $\Sigma(\Omega)$ je abstraktní entita účelově vytvořená subjektem na primární entitě Ω (soustavě) z hlediska řešeného problému, přičemž jeho strukturu tvoří formalizované prvky týkající se entity, které jsou z hlediska řešeného problému a na určité rozlišovací úrovni jeho řešení podstatné [38].

Systémová metodologie je abstraktní objekt s touto strukturou: se systémovým přístupem, systémovým myšlením, systémovými disciplínami a systémovými algoritmy [38].

Systémové myšlení je takový specifický způsob myšlení, který při řešení problémových situací na systémových objektech respektuje atributy systémového přístupu, přičemž je průnikem progresivních typů myšlení, tedy myšlení produktivního, analyticko-syntetického, divergentního, reaktivního a kreativního [38].

Systémové pojetí entity je takový přístup k entitě, při němž systémově myslící subjekt aplikuje systémový přístup, systémové disciplíny (metody) a systémové algoritmy, tedy systémovou metodologii [38].

Systémový přístup je zobecněná tvůrčí metodologie myšlení a konání, aplikovatelná na reálné nebo abstraktní systémové objekty, resp. subjekty, která je představovaná posloupností uvědomělých, realizovatelných, popsatečných, případně i formalizovaných činností, respektujících systémové atributy [41].

Systémový přístup vytyčuje východiska, přístupy a vlastnosti entit pro jejich komplexní analýzu, které označuje jako **atributy** systémového přístupu [38].

Systémový přístup je zobecněná tvůrčí metodologie myšlení a konání jedince aplikovatelná na jakékoli systémové entity, přičemž tato metodologie je tvořena posloupností uvědomělých, popsatečných, realizovatelných, případně i formalizovaných činností, respektujících atributy systémového přístupu [38].

Vazba vyjadřuje možnost vzájemného ovlivnění prvků a má tedy charakter podstaty spojení [41].

13 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Vnější a vnitřní faktory působící na produkt.....	8
Obr. 2 Odchylka reálného stroje od ideálního.....	8
Obr. 3 Hlavní části CNC obráběcího stroje.....	9
Obr. 4 CNC obráběcí stroj pro rotační a nerotační obrobek.....	12
Obr. 5 3D obrábění.....	12
Obr. 6 5D obrábění.....	13
Obr. 7 Pohyb nástroje při 3D a 5D obrábění.....	14
Obr. 8 Vidlicová a univerzální (diagonální) hlava.....	15
Obr. 9 Vidlicová hlava a rotační stůl.....	15
Obr. 10 Rotační a naklápěcí stůl a pevné vřeteno.....	15
Obr. 11 Morfologie rotační náhonové soustavy.....	16
Obr. 12 Způsoby náhonu vřetena frézovacího CNC obráběcího centra pracujícího 3D technologií obrábění.....	17
Obr. 13 Portálové obráběcí centrum – typický představitel pro rotační osy v nástroji.....	18
Obr. 14 Technologická adaptibilita dosažená aplikací hlav.....	18
Obr. 15 Způsoby náhonu vřetena frézovacího CNC obráběcího centra pracujícího 5D technologií obrábění.....	19
Obr. 16 Způsoby náhonu a naklápění vřetena soustružnického multifunkčního CNC obráběcího centra pracujícího 4D technologií obrábění.....	20
Obr. 17 Porovnání způsobů náhonů naklápění vřetena frézovacího CNC obráběcího centra pracujícího 5D, nebo 4D technologií obrábění.....	20
Obr. 18 Způsoby náhonu a uložení desky stolu CNC soustružnického obráběcího centra pracujícího 4D technologií obrábění.....	21
Obr. 19 Způsoby náhonu a uložení desky stolu CNC frézovacího obráběcího centra pracujícího 4D technologií obrábění.....	22
Obr. 20 Rotačně naklápěcí stoly s mechanickým náhonem u svislého a vodorovného CNC frézovacího obráběcího centra pracujícího 5D technologií obrábění.....	22
Obr. 21 Rotačně naklápěcí stoly s náhonem vestavěným motorem u svislého CNC frézovacího obráběcího centra pracujícího 5D technologií obrábění.....	23
Obr. 22 Rotačně naklápěcí stůl s náhonem vestavěným motorem u svislého CNC frézovacího obráběcího centra pracujícího 5D technologií obrábění.....	23
Obr. 23 Rotační stůl a univerzální hlava u svislého CNC frézovacího obráběcího centra pracujícího 5D technologií obrábění.....	24
Obr. 24 Grafické vyjádření chyby měření.....	26
Obr. 25 Přesnost měření – Chybový přístup.....	27
Obr. 26 Celkový výsledek měření upraven dle.....	28
Obr. 27 Normální (Laplaceovo – Gaussovo) rozdělení.....	29
Obr. 28 Vlivy působící na přesnost výroby CNC obráběcího stroje.....	30
Obr. 29 Návaznost přesností u obráběcích strojů.....	31
Obr. 30 Diagram stability frézování stroje Genos.....	36
Obr. 31 Geometrické chyby rotační osy C.....	37
Obr. 32 Geometrické chyby lineární osy X.....	38

Obr. 33	Nastavení měřicího systému pro měření přesnosti polohování	38
Obr. 34	Princip měření přesnosti polohování interferometrem	39
Obr. 35	Výhody kompenzace prostředí	40
Obr. 36	Princip měření přímosti	41
Obr. 37	Měření přímosti úhlovými optikami	42
Obr. 38	Měření přímočarosti lineárního pohybu vřeteníku	43
Obr. 39	Princip měření kolmosti horizontálních os s jednou pozicí laseru	43
Obr. 40	Měření kolmosti portálového obráběcího centra	44
Obr. 41	Víceosý kalibrátor XM 60	45
Obr. 42	Systém Ballbar QC20 – W.....	46
Obr. 43	Volumetrická chyba se znázorněním vektorů v prostoru	47
Obr. 44	Měřicí zařízení LTc druhé generace	47
Obr. 45	Princip měření zařízením LTc	48
Obr. 46	Čelní házivost upínací plochy stolu při otáčení	49
Obr. 47	Vychýlení dotykového hrotu	50
Obr. 48	Rozdíl mezi skutečnou pozicí rotační osy a polohou v kinematickém modelu stroje	51
Obr. 49	Měření kinematiky cyklem KinematicsOpt	52
Obr. 50	Kalibrace rotačního stolu pomocí systému XR20 – W.....	53
Obr. 51	Chyba při vyrovnání XR20-W.....	54
Obr. 52	Princip synchronizace rotační a lineární osy	54
Obr. 53	Měření volumetrické chyby osy C	55
Obr. 54	Zajištění přesnosti pomocí pravidelné kalibrace VCS Complete	56
Obr. 55	Obecný postup měření Ballbar Trace	56
Obr. 56	Měřicí zařízení Rotary Analyzer.....	57
Obr. 57	Měření pomocí Spindle Error Analyzer.....	58
Obr. 58	Pohled na stroj DMU 75 monoBlock®	62
Obr. 59	Struktura systémové metodologie.....	65
Obr. 60	Vlivy působící na CNC obráběcí stroj v místě instalace	68
Obr. 61	Hrubé znázornění metodiky pro predikci vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic pro obrobek	71
Obr. 62	Nasazení vybraných měřicích zařízení při zavádění volumetrických kompenzací pro tříosá obráběcí centra	73
Obr. 63	Nasazení vybraných měřicích zařízení při zavádění volumetrických kompenzací pro víceosá obráběcí centra	73
Obr. 64	Počet geometrických chyb u tříosého obráběcího centra.....	74
Obr. 65	Počet geometrických chyb u pětiosého obráběcího centra	74
Obr. 66	Příklad možných přístrojů pro volumetrické kompenzace rotačních os.....	74
Obr. 67	Strategie predikce chování CNC obráběcího stroje pro čtvero ročních období.....	75
Obr. 68	Metodika pro predikování vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic pro obrobek u CNC obráběcích strojů – část A	76
Obr. 69	Metodika pro predikování vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic pro obrobek u CNC obráběcích strojů – část B.....	77

Obr. 70	Metodika pro predikování vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic pro obrobek u CNC obráběcích strojů – část C.....	78
Obr. 71	Metodika pro predikování vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic pro obrobek u CNC obráběcích strojů – část D	79
Obr. 72	Měření geometrické přesnosti stroje (čelní a obvodové házení) desky stolu u svislého soustružnického obráběcího centra firmy TOSHULIN	81
Obr. 73	Příklad kompenzovatelných chyb u pětiosých CNC obráběcích strojů.....	83
Obr. 74	Příklad kompenzovatelných chyb u pětiosých CNC obráběcích strojů pomocí technologického cyklu 5-Axis Auto Tuning.....	84
Obr. 75	Měření pracovní přesnosti u svislého soustružnického obráběcího centra firmy TOSHULIN	86
Obr. 76	DMU 75 monoBlock	87
Obr. 77	Výsledky měření volumetrické přesnosti lineárních os před a po kompenzaci.....	89
Obr. 78	Přesnost kruhové interpolace v rovině XY před a po volumetrické kompenzaci.....	90
Obr. 79	Chyba ECC osy C	90
Obr. 80	Chyba EAC osy C.....	90
Obr. 81	Chyba EBC osy C	91
Obr. 82	Chyba EXC osy C	91
Obr. 83	Chyba EYC osy C.....	91
Obr. 84	Chyba EZC osy C	92
Obr. 85	Ukázka měření osy C zařízením Laser Tracer na stroji DMU.....	92
Obr. 86	Chyba EAA osy A	93
Obr. 87	Chyba EBA osy A.....	93
Obr. 88	Chyba ECA osy A.....	93
Obr. 89	Chyba EXA osy A	94
Obr. 90	Chyba EYA osy A	94
Obr. 91	Chyba EZA osy A.....	94
Obr. 92	Chyba B0A a C0A osy A.....	95
Obr. 93	Ukázka měření osy A zařízením Laser Tracer na stroji DMU	95
Obr. 94	Chyba EXA osy A pomocí Ballbar Trace	96
Obr. 95	Chyba EXC osy C pomocí Ballbar Trace	97
Obr. 96	Ukázka měření chyby EXA pomocí Ballbar Trace na stroji DMU	97
Obr. 97	Výsledky měření osy C pomocí cyklu 3D QuickSET	98
Obr. 98	Výsledky měření osy A pomocí cyklu 3D QuickSET	98
Obr. 99	Ukázka měření osy C pomocí cyklu 3D QuickSET na stroji DMU	99
Obr. 100	Ukázka měření osy A pomocí cyklu 3D QuickSET na stroji DMU	99
Obr. 101	Výsledek měření osy C zařízením rotary analyzer	100
Obr. 102	Výsledek měření osy A zařízením rotary analyzer.....	100
Obr. 103	Ukázka měření osy C a A zařízením rotary analyzer na stroji DMU.....	101
Obr. 104	Čelní a obvodové házení desky stolu svislého soustruhu v závislosti na velikosti a roku výroby.....	115
Obr. 105	Chápání různých typů přesnosti u uživatel a výrobce CNC obráběcího stroje.	116

14 SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Parametry zařízení XL – 80 pro měření přesnosti polohování	40
Tab. 2: Parametry zařízení XL – 80 pro měření přímosti a úhlových chyb.....	42
Tab. 3: Parametry zařízení XL – 80 pro měření kolmosti	44
Tab. 4: Parametry zařízení XM – 60 pro měření šesti geometrických chyb.....	45
Tab. 5: Parametry zařízení DBB QC20 – W pro měření přesnosti kruhové interpolace	46
Tab. 6: Parametry zařízení Laser TRACER pro měření volumetrické přesnosti.....	48
Tab. 7: Parametry zařízení XR20 – W pro měření přesnosti polohování rotačních os.....	54
Tab. 8: Parametry zařízení rotary analyzer	57
Tab. 9: Parametry zařízení Spidle Error Analyzer	58
Tab. 10: Měření geometrických chyb rotační osy C různými zařízeními.....	59
Tab. 11: Parametry stroje DMU 75 monoBlock	87
Tab. 12: Výsledky přesností polohování os dle technické dokumentace stroje.....	88
Tab. 13: Predikce volumetrické přesnosti u čtyřosých CNC obráběcích strojů s rotačními osami pro obrobek	102
Tab. 13: Predikce volumetrické přesnosti u čtyřosých CNC obráběcích strojů s rotačními osami pro obrobek – pokračování	103
Tab. 13: Predikce volumetrické přesnosti u čtyřosých CNC obráběcích strojů s rotačními osami pro obrobek – dokončení	104
Tab. 14: Predikce volumetrické přesnosti u pětiosých CNC obráběcích strojů s rotačními osami pro obrobek	105
Tab. 14: Predikce volumetrické přesnosti u pětiosých CNC obráběcích strojů s rotačními osami pro obrobek – pokračování	106
Tab. 14: Predikce volumetrické přesnosti u pětiosých CNC obráběcích strojů s rotačními osami pro obrobek – pokračování	107
Tab. 14: Predikce volumetrické přesnosti u pětiosých CNC obráběcích strojů s rotačními osami pro obrobek – dokončení	108

15 VLASTNÍ PUBLIKACE AUTORA

2018

MAREK, T.; BERTHOLD, J.; REGEL, J.; HOLUB, M. A quasi-online geometric errors compensation method on CNC machine tool. In Proceedings of the 2018 18th International Conference on Mechatronics – Mechatronika (ME). 1. Brno: Brno University of Technology, 2018, p. 537-541. ISBN: 978-80-214-5543-6.

HOLUB, M.; MAREK, T.; MAREK, J.; BLECHA, P.; BRADÁČ, F. *Metodický postup zavádění volumetrických kompenzací 5ti osých obráběcích center s kinematikou "BK". Certifikát č. 012/2018/TLO.* VUT FSI: 2018. s.

MAREK, T. Měření a kontrola obráběcích strojů. V Konstrukce CNC obráběcích strojů IV. MM publishing, s.r.o., 2018. s. ISBN: 978-80-906310-8-3.

2017

MAREK, T.; MAREK, J. Mít sondu nestačí. Olomoucká 1164/85, Brno: Renishaw s.r.o., 2017. 121 s. ISBN: 978-80-87017-20-3.

HOLUB, M.; BLECHA, P.; VETIŠKA, J.; MAREK, T.; BRADÁČ, F.; KNOBLOCH, J.; MINÁŘ, P.; FIALA, Z.; ZBOŽÍNEK, R. *Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2016.* Brno: 2017. s. 3-16.

HOLUB, M.; BLECHA, P.; VETIŠKA, J.; MAREK, T.; BRADÁČ, F. *Výzkumná zpráva popisující dosažené výsledky za rok 2016.* Brno: 2017. s. 5-89.

2016

HOLUB, M.; BLECHA, P.; BRADÁČ, F.; MAREK, T.; ŽÁK, Z. GEOMETRIC ERRORS COMPENSATION OF CNC MACHINE TOOL. *MM Science Journal*, 2016, vol. 2016, no. DECEMBER, p. 1602-1607. ISSN: 1803-1269.

2015

KNOBLOCH, J.; MAREK, T.; KOLÍBAL, Z. ERROR MOTION ANALYSIS OF MACHINE SPINDLE UNDER LOAD. *MM Science Journal*, 2015, roč. 2015, č. December, s. 744-747. ISSN: 1805- 0476.

MAREK, J.; NEŠPOR, V.; MAREK, T.; NOVOTNÝ, L. *Moderní metody při obrábění kuličkových šroubů.* 2015., konferenční sborník, s. 27-34.

NOVOTNÝ, L.; MAREK, J.; MAREK, T. Issue of Rigidity of the Ball Screw Nut Exposed to Bending Stress during Bending Stress of the Ball Screw. In *Engineering mechanics 2015 - extended abstracts*. 2015. p. 214-215. ISBN: 978-80-86246-42- 0.

HOLUB, M.; VETIŠKA, J.; BRADÁČ, F.; BLECHA, P.; PERNIKÁŘ, J.; MAREK, T.; KNOBLOCH, J.; MINÁŘ, P.; ZBOŽÍNEK, R. *Odborná zpráva popisující proběhlé testy a analyzující dosažené výsledky*. Brno: 2015. s. 9-78.

HOLUB, M.; VETIŠKA, J.; BRADÁČ, F.; BLECHA, P.; PERNIKÁŘ, J.; MAREK, T.; KNOBLOCH, J.; MINÁŘ, P.; ZBOŽÍNEK, R. *Odborná zpráva popisující dosažené výsledky testování přístrojového vybavení na obráběcích strojích*. Brno: 2015. s. 6-188.

16 TVŮRČÍ AKTIVITY A PROJEKTY AUTORA

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

TA04011406 - Využití progresivních technologií pro efektivní stavbu obráběcích strojů,
zahájení: 01.07.2014, ukončení: 31.12.2017, člen řešitelského týmu

Zpracování studijní opory do předmětu „Výrobní stroje a zařízení – FVY“, zahájení 1.5.2017,
ukončení 31.12.2017, id projektu FV 17-29

Inovace předmětu "Test Code for Machine Tools - GTS-A" a "Testování obráběcích strojů - GTS" o zkoušku statické tuhosti obráběcího centra, zahájení: 01.04.2015, ukončení:
31.12.2015, id projektu FV 15-22

KNOBLOCH, J.; MAREK, T.; NĚMEC, Z.; VETIŠKA, J.: ZJ-2/10; Jednoosá zatěžovací
jednotka pro měření statické tuhosti. VUT v Brně, FSI, Technická 2896/2, Brno hala - C1/118.
(funkční vzorek)

17 OSTATNÍ ČINNOST AUTORA

2015 – Součást pořadatelského týmu mezinárodního workshopu QERS

2016 – Součást pořadatelského týmu mezinárodního workshopu QERS

2017 – Součást pořadatelského týmu mezinárodního workshopu QERS