

Vliv konfigurace obráběcího stroje na jeho prostorovou geometrickou přesnost

Ing. Martin Morávek

Vedoucí práce: Doc. Ing. Pavel Bach CSc.

Abstrakt

Úkolem této práce je sestavit systém výpočtových rovnic pro charakterizování prostorové geometrické přesnosti v celém pracovním prostoru obráběcího stroje dosažitelné s danými odchylkami polohování v osách, odchylkami přímostí v osách a rovinách a kolmostí mezi osami. Zvláštní pozornost je věnována úhlovým odchylkám. Provést vhodné analýzy a rozborů získaných výsledků. Práce předpokládá tříosý vertikální CNC frézovací stroj v nejpoužívanějších konfiguracích.

Klíčová slova

Přesnost, obráběcí stroj, polohování

1. Úvod

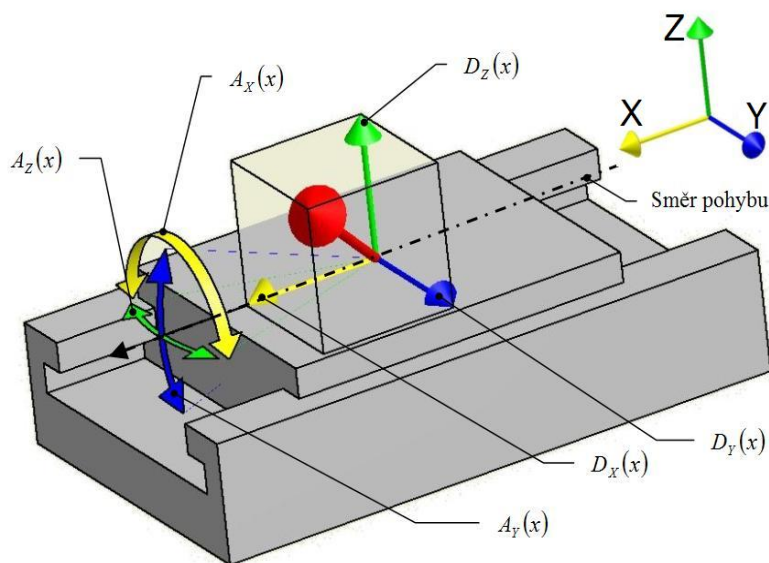
Cílem této práce je sestavit výpočtový model pro stanovení prostorové geometrické přesnosti v celém objemu pracovního prostoru obráběcího stroje. Konkrétně se zaměřit na případ tříosého vertikálního CNC frézovacího stroje v nejčastěji užívaných konfiguracích uspořádání posuvových os. Jako vstupní data použít geometrické odchylky polohování v osách, odchylky přímostí v osách a rovinách a kolmosti mezi nimi. Zvláště se zaměřit na úhlové odchylky. Provést vhodné analýzy a rozborů získaných výsledků, na jejichž základě bude možné stanovit vlivy geometrických chyb na výslednou přesnost obráběcího stroje.

2. Geometrické úchyly vyskytující se na tříosém frézovacím stroji

Lineární pohyb každé strojní osy je ovlivněn šesti geometrickými úchyly, jež reprezentují šest stupňů volnosti tělesa v prostoru [2]. Například pro pohyb osy X (Obr. 1), jsou to následující chyby:

- Úchylka polohy ve směru pohybu $D_x(x)$
- vertikální úchylka přímocárosti $D_z(x)$
- horizontální úchylka přímocárosti $D_y(x)$
- naklání $A_x(x)$
- klopení $A_y(x)$
- natáčení $A_z(x)$

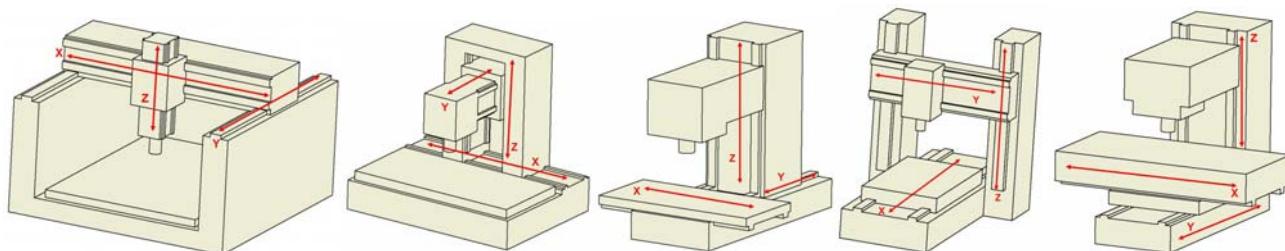
Pro případ frézky se třemi lineárními řízenými osami dostáváme tedy celkem 18 geometrických chyb. Dále je nutné připočítat ještě tři chyby nekolmosti mezi jednotlivými osami, tedy: S_{xy} , S_{yz} a S_{zx} [3].



Obr. 1: Schéma chyb při pohybu posuvové osy X

3. Volba konfigurací

Práce se zaměřuje na tříosý vertikální CNC frézovací stroj v nejčastěji užívaných konfiguracích uspořádání posuvových os. Analyzováním portfolia tuzemských, ale i zahraničních výrobců bylo zvoleno pět nejhojněji se vyskytujících konfigurací. Jsou jimi FYXZ, FXZY, XFYZ, XFZY a YXFZ, viz Obr. 2. Kde písmena před F značí posuvové osy pohyblivé obrobkem a písmena za F značí posuvové osy pohyblivé nástrojem.



Obr. 2: Vybrané konfigurace tříosých vertikálních CNC frézovacích strojů, zleva doprava FYXZ, FXZY, XFYZ, XFZY, YXFZ

4. Sestavení výpočtových vztahů

Výpočet prostorové geometrické chyby v celém objemu pracovního prostoru předpokládá užití geometrických chyb projevujících se při pohybu strojních os a rozsahů pojezdů jednotlivých os jako vstupní data. Pro úspěšný výpočet prostorové geometrické chyby je třeba vhodným způsobem popsat pohybovou strukturu stroje. V drtivé většině případů se pro tento účel užívá popisu pomocí homogenních transformačních matic. Získáme tak vektorovou rovnici o třech složkách respektujících směry souřadného systému stroje, která obsahuje údaje o poloze os a geometrických chybách, jimiž je přesnost dosažení této polohy ovlivněna [4]. Konkrétně je pro popis užitá metoda odvozování rovnic prezentovaná v [5]. Předností této metody je, že v rovnicích jsou uvažovány pouze některé úhlové geometrické chyby, které jsou pro konkrétní konfiguraci podstatné. Odvozené rovnice pro pět vybraných konfigurací uvádějí vztahy (1) až (5). Kde P je vektor polohy bodu v pracovním prostoru stroje a jeho index

značí příslušnou konfiguraci. Složky P_X , P_Y a P_Z označují souřadnice polohy v osách X, Y a Z.

$$P_{FYXZ} = \begin{bmatrix} P_X \text{ FYXZ} \\ P_Y \text{ FYXZ} \\ P_Z \text{ FYXZ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + D_X(x) + z.A_Y(x) + D_X(y) + z.A_Y(y) + D_X(z) \\ y + D_Y(x) - z.A_X(x) + D_Y(y) - z.A_X(y) + x.A_Z(y) + D_Y(z) \\ z + D_Z(x) + D_Z(y) - x.A_Y(y) + D_Z(z) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$P_{FXZY} = \begin{bmatrix} P_X \text{ FXZY} \\ P_Y \text{ FXZY} \\ P_Z \text{ FXZY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + D_X(x) - y.A_Z(x) + z.A_Y(x) + D_X(y) + D_X(z) - y.A_Z(z) \\ y + D_Y(x) - z.A_X(x) + D_Y(y) + D_Y(z) \\ z + D_Z(x) + y.A_X(x) + D_Z(y) + D_Z(z) + y.A_X(z) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$P_{XFYZ} = \begin{bmatrix} P_X \text{ XFYZ} \\ P_Y \text{ XFYZ} \\ P_Z \text{ XFYZ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + D_X(x) + z.A_Y(x) - y.A_Z(x) + D_X(y) + z.A_Y(y) + D_X(z) \\ y + D_Y(x) - z.A_X(x) + D_Y(y) - z.A_X(y) + x.A_Z(y) + D_Y(z) \\ z + D_Z(x) - x.A_Y(x) + y.A_X(x) + D_Z(y) + D_Z(z) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$P_{XFZY} = \begin{bmatrix} P_X \text{ XFZY} \\ P_Y \text{ XFZY} \\ P_Z \text{ XFZY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + D_X(x) + z.A_Y(x) - y.A_Z(x) + D_X(y) + z.A_Y(y) + D_X(z) \\ y + D_Y(x) + x.A_Z(x) - z.A_X(x) + D_Y(y) + D_Y(z) \\ z + D_Z(x) + y.A_X(x) - x.A_Y(x) + D_Z(y) + D_Z(z) + y.A_X(z) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$P_{YXFZ} = \begin{bmatrix} P_X \text{ YXFZ} \\ P_Y \text{ YXFZ} \\ P_Z \text{ YXFZ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + D_X(x) - y.A_Z(x) + z.A_Y(x) + D_X(y) - y.A_Z(y) + z.A_Y(y) + D_X(z) \\ y + D_Y(x) - z.A_X(x) + x.A_Z(x) + D_Y(y) - z.A_X(y) + D_Y(z) \\ z + D_Z(x) + y.A_X(x) - x.A_Y(x) + D_Z(y) + y.A_X(y) + D_Z(z) \end{bmatrix} \quad (5)$$

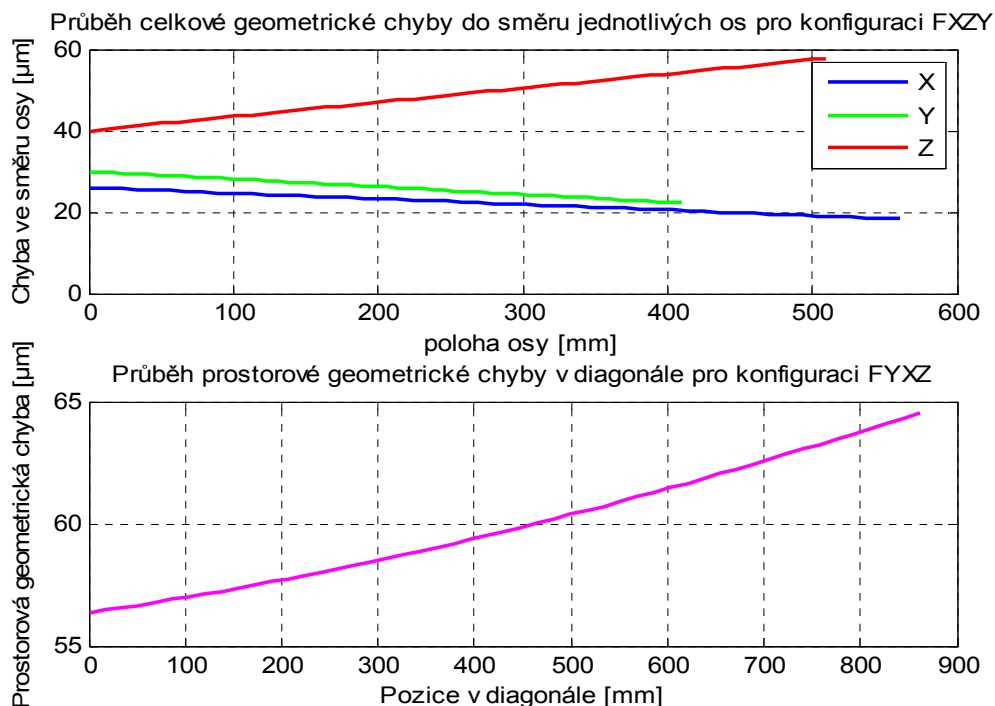
5. Rozbor výsledků získaných z výpočtového modelu, vliv úhlových odchylek

Rozbory se zaměřily na analyzování průběhů prostorové geometrické chyby a jejích složek do směrů pohybových os obráběcího stroje. Průběhy pro případ konfigurace FYXZ ukazuje Obr. 3. Je však třeba zdůraznit, že výsledná geometrická chyba ve směru jedné z os je ovlivněna geometrickými chybami všech os, jež se na stroji vyskytují.

Dále byl proveden rozbor citlivosti stroje na změnu rozměru nástroje a rozbor citlivosti stroje na změnu délky posuvu jedné z jeho os.

Jako vstupní data byly do výpočtového modelu pro stanovení prostorové geometrické přesnosti použity hodnoty tolerance geometrických chyb uvedené v předávacím protokolu stroje VCN 410.

Výsledky provedených rozborů jsou zhodnoceny v závěru.



Obr. 3: Průběh prostorové geometrické chyby a jejích složek do směrů os souřadného systému pro případ konfigurace FXZY

6. Vytvoření modelu prostorové geometrické přesnosti v celém objemu pracovního prostoru obráběcího stroje

Tato část práce se zaměřila na vytvoření modelu, který by znázorňoval přesnost v celém objemu pracovního prostoru obráběcího stroje. Za vstupní hodnoty byly užity opět tolerance uvedené v předávacím protokolu stroje VCN 410 a dále bylo užito hodnot geometrických odchylek naměřených na tomto stroji dle platných norem, viz. [6]. Výsledek vypočtený z naměřených hodnot je vykreslen na Obr. 4.

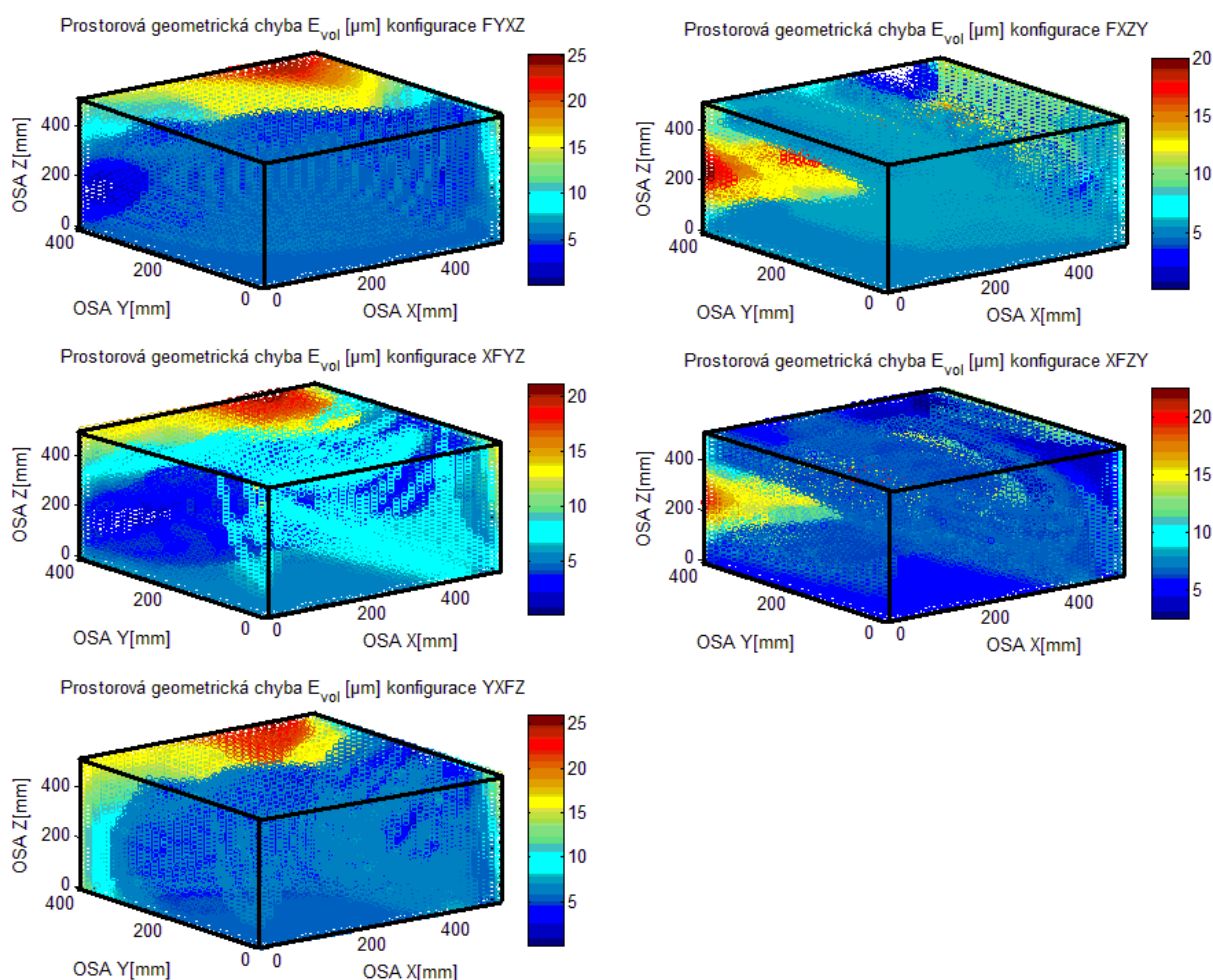
7. Závěr

Výsledky provedených rozborů objasnily jak mezi sebou úhlové chyby vzájemně působí. Které úhlové chyby jsou pro danou konfiguraci rozhodující a které podstatné nejsou. Využití toho lze například při seřizování stroje, neboť při znalosti vzájemného působení jednotlivých chyb a jejich znamének lze odhadnout, jakým směrem se bude vyvíjet výsledná prostorová geometrická chyba. Dále je možné na základě získaných výsledků doporučit která z vybraných konfigurací nejlépe vyhovuje danému typu frézovací operace, případně která z konfigurací je nejuniverzálnější.

Rozborem zkoumajícím citlivost konfigurací na změnu délky jedné z posuvových os bylo zjištěno, že pro případ stroje, kdy je pojezd jedné z os výrazně delší, než pojezd zbylých je nejvýhodnější uspořádání, kdy dlouhá osa leží na rámu stroje a unáší ostatní osy spolu s nástrojem. Stůl stroje je koncipován jako pevný.

Analýza citlivosti na změnu rozměru nástroje ukázala, že největší chyba způsobená nástrojem se odvíjí od jeho délky, průměr nástroje má na změnu chyby malý vliv.

Model, jež vykresluje prostorovou geometrickou přesnost v celém objemu pracovního prostoru stroje může sloužit jako vhodný nástroj pro vytvoření určité představy o průběhu chyby v oblastech pracovního prostoru stroje, při znalosti hodnot geometrických odchylek. Jako další možný vývoj v této oblasti výzkumu se nabízí především rozšířit výpočtový model o rotační osy, což by umožňovalo modelování prostorové geometrické přesnosti víceosých frézovacích center, soustružnických a multifunkčních obráběcích strojů, ale i dalších typů obráběcích strojů. Dále pak zahrnout do výpočtu teplotní a silové deformace nosné struktury stroje.



Obr. 4: Zobrazení prostorové geometrické přesnosti v celém objemu pracovního prostoru pro vybrané konfigurace

Seznam symbolů

$A_x(x)$	úhlová odchylka osy X s osou rotace X, naklánění (ROLL) osy X	$[\mu m / m]$
$A_x(y)$	úhlová odchylka osy Y s osou rotace X, klopení (PITCH) osy Y	$[\mu m / m]$
$A_x(z)$	úhlová odchylka osy Z s osou rotace X, natáčení (YAW) osy Z	$[\mu m / m]$
$A_y(x)$	úhlová odchylka osy X s osou rotace Y, klopení (PITCH) osy X	$[\mu m / m]$
$A_y(y)$	úhlová odchylka osy Y s osou rotace Y, naklánění (ROLL) osy Y	$[\mu m / m]$

$A_y(z)$	úhlová odchylka osy Z s osou rotace Y, klopení (PITCH) osy Z	$[\mu m / m]$
$A_z(x)$	úhlová odchylka osy X s osou rotace Z, natáčení (YAW) osy X	$[\mu m / m]$
$A_z(y)$	úhlová odchylka osy Y s osou rotace Z, natáčení (YAW) osy Y	$[\mu m / m]$
$A_z(z)$	úhlová odchylka osy Z s osou rotace Z, naklánění (ROLL) osy Z	$[\mu m / m]$
CNC	Computer Numerical Control, číslicové řízení strojů	$[-]$
$D_x(x)$	odchylka polohy ve směru osy X	$[\mu m]$
$D_x(y)$	přímochařost pohybu osy Y ve směru osy X	$[\mu m]$
$D_x(z)$	přímochařost pohybu osy Z ve směru osy X	$[\mu m]$
$D_y(x)$	přímochařost pohybu osy X ve směru osy Y	$[\mu m]$
$D_y(y)$	odchylka polohy ve směru osy Y	$[\mu m]$
$D_y(z)$	přímochařost pohybu osy Z ve směru osy Y	$[\mu m]$
$D_z(x)$	přímochařost pohybu osy X ve směru osy Z	$[\mu m]$
$D_z(y)$	přímochařost pohybu osy Y ve směru osy Z	$[\mu m]$
$D_z(z)$	odchylka polohy ve směru osy Z	$[\mu m]$
E_{VOL}	Prostorová geometrická chyba	$[\mu m]$
FXZY	konfigurace obráběcího stroje se všemi posuvovými osami v nástrojové větvi v pořadí X, Z, Y směrem od rámu k nástroji	$[-]$
FYZX	konfigurace obráběcího stroje se všemi posuvovými osami v nástrojové větvi v pořadí Y, X, Z směrem od rámu k nástroji	$[-]$
P	vektor polohy v pracovním prostoru obráběcího stroje ovlivněné geometrickými odchylkami	$[mm]$
P_X	složka vektoru polohy nástroje ovlivněné geometrickými odchylkami pohybových os do směru osy X	$[mm]$
P_Y	složka vektoru polohy nástroje ovlivněné geometrickými odchylkami pohybových os do směru osy Y	$[mm]$
P_Z	složka vektoru polohy nástroje ovlivněné geometrickými odchylkami pohybových os do směru osy Z	$[mm]$
S_{XY}	kolmost mezi osami X a Y	$[\mu m / m]$
S_{YZ}	kolmost mezi osami X a Z	$[\mu m / m]$
S_{ZX}	kolmost mezi osami Y a Z	$[\mu m / m]$
x	souřadnice polohy pohybové osy X	$[mm]$
X	posuvová osa X obráběcího stroje	$[-]$
XFYZ	konfigurace obráběcího stroje s posuvovými osami Y a Z v nástrojové větvi v pořadí směrem od rámu k nástroji a osu X v obrobkové větvi	$[-]$
XFZY	konfigurace obráběcího stroje s posuvovými osami Z a Y v nástrojové větvi v pořadí směrem od rámu k nástroji a osu X v obrobkové větvi	$[-]$
y	souřadnice polohy pohybové osy Y	$[mm]$
Y	posuvová osa Y obráběcího stroje	$[-]$
YXFZ	konfigurace obráběcího stroje s posuvovými osami Y a X v obrobkové větvi v pořadí směrem od rámu k nástroji a osu Z v obrobkové větvi	$[-]$
z	souřadnice polohy pohybové osy Z	$[mm]$
Z	posuvová osa Z obráběcího stroje	$[-]$

Seznam použité literatury

- [1] SCHULTSCHIK, R.: *The Components of the Volumetric Accuracy*, CIRP, 1977
- [2] STEJSKAL, V., VALÁŠEK, M.: *Kinematics and Dynamics of Machinery*, Dekker, New York, 1996
- [3] MEKID, S.: *Introduction to Precision Machine Design and Error Assessment*, CRC Press, New York, 2008
- [4] WANG, C.: *Current Issue on 3D Volumetric Positioning Accuracy: Measurement, Compensation and Definition*, Optodyne Inc., Rancho Dominguez, CA 90220, USA
- [5] JIANGUO, Y., YONGQIAN, R., LIOTTO, G., WANG, C.: *Theoretical derivations of 4 body diagonal displacement errors in 4 machine configurations*, Optodyne Inc., Compton, California, USA
- [6] ČSN ISO 230-1:1998, *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění*, ČSNI, 2003