

# Dynamické chyby interpolace.

Chyby při lineární a kruhové interpolaci.

Radomír Mendřický – Elektrické pohony a servomechanismy

10.12.2014



## Obsah prezentace

- Chyby interpolace
- Chyby při lineární interpolaci
  - Vlivem nestejných polohových zesílení interpolujících servomechanismů
  - Vlivem nestejné dynamiky interpolujících servomechanismů (rychlostních smyček)
- Chyby při kruhové interpolaci
  - Vlivem dynamiky polohového servomechanismu
  - Vlivem nestejných polohových zesílení interpolujících servomechanismů
  - Vlivem nestejné dynamiky interpolujících servomechanismů
  - Chyby při přechodu kvadrantů vlivem pasivních odporů

## Chyby interpolace

- Při současném pohybu dvou a více souřadnic stroje – **interpolaci** – dochází k dynamickým odchylkám skutečné dráhy nástroje od programovaného tvaru.
- Velikost dynamických chyb závisí na rychlosti a zrychlení pohybu, dále na poloměru křivosti zadané dráhy a na parametrech interpolujících souřadnic.
- Nabývají významu především při vysokých posuvových rychlostech a zrychlení, např. nad 1 m / min, resp. 2 m / s<sup>2</sup>.

# Chyby při lineární interpolaci

- Při lineární interpolaci vznikají v zásadě chyby dvojího druhu:
  - a) Vlivem nestejných polohových zesílení interpolujících servomechanismů
  - b) Vlivem nestejné dynamiky interpolujících servomechanismů (rychlostních smyček)

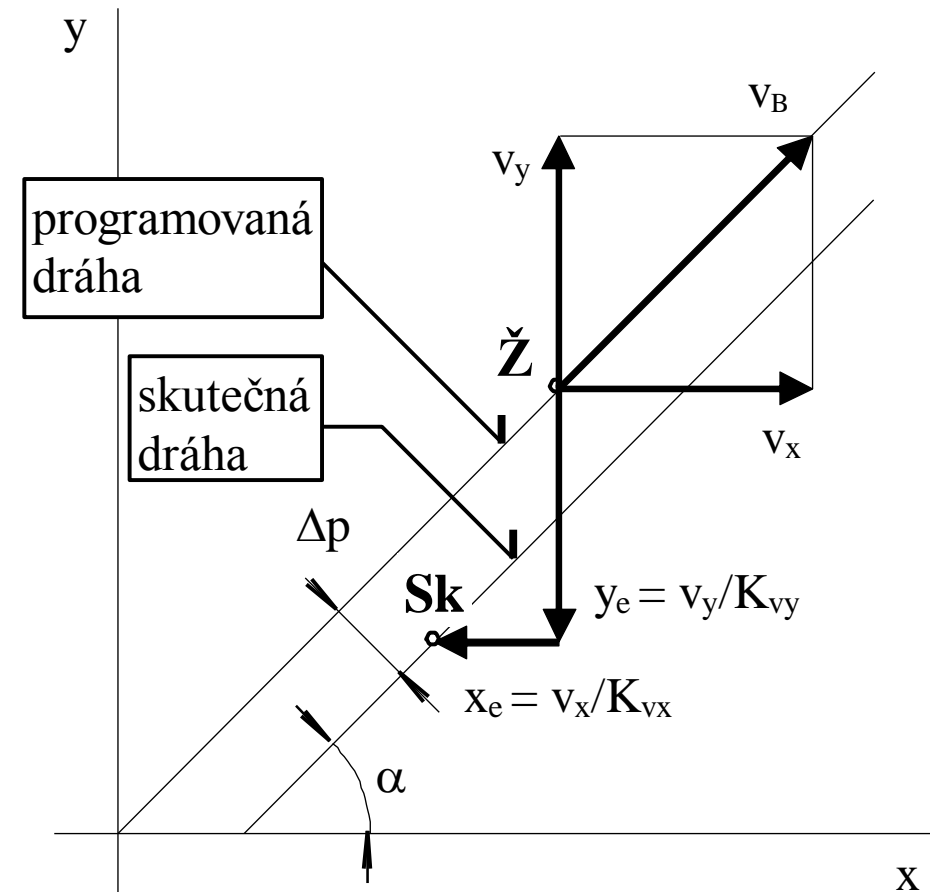
# Chyby při lineární interpolaci

## a) Nestejné polohové zesílení

- Při nestejných polohových zesíleních interpolujících souřadnic  $K_{vx}$  a  $K_{vy}$  vzniká chyba tvaru – posunutí skutečné dráhy vůči programované přímce.
- Chyba je způsobena tím, že sledovací odchylky  $x_e$  a  $y_e$  vlivem nestejných hodnot  $K_v$  posunou bod, ve kterém se nachází servomechanismus („Sk“), mimo programovanou dráhu.

$$x_e = x_{\check{z}} - x = v_x / K_{vx}$$

$$y_e = y_{\check{z}} - y = v_y / K_{vy}$$

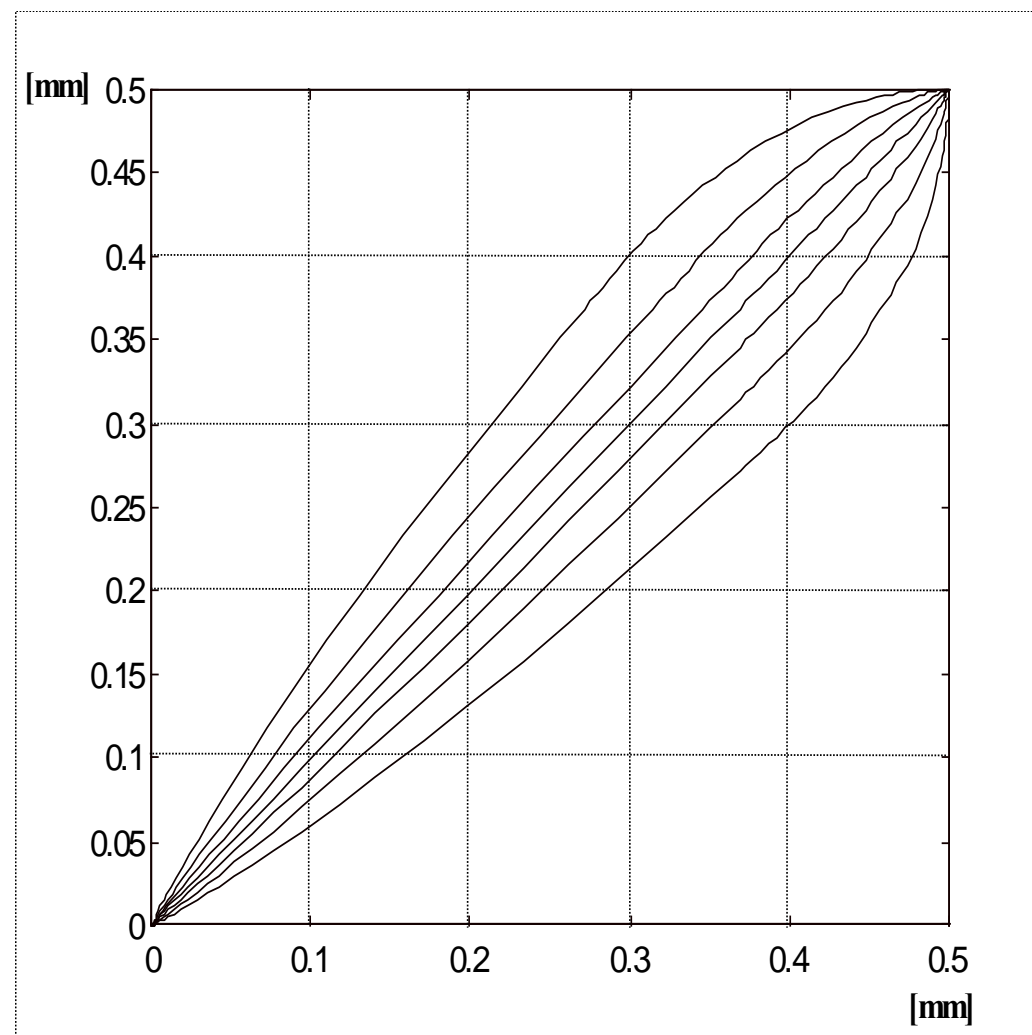


# Chyby při lineární interpolaci

## a) Nestejné polohové zesílení

- Chyba tvaru vlivem nestejného  $K_v$ .

*Obr.: velmi krátká dráha (0,5 mm) projetá velmi vysokou rychlostí ( $v_B = 120$  m/min) pod úhlem 45 stupňů. Jednotlivé křivky odpovídají skutečné trajektorii při poměru zesílení  $K_{v_x}/K_{v_y}$  0,5 – 0,67 – 0,83 – 1,0 – 1,2 – 1,5 – 2,0.*



# Chyby při lineární interpolaci

## a) Nestejně polohové zesílení

- Závislost chyby tvaru (tzv. paralelní odlehlost) na objížděcí rychlosti „ $v_B$ “ a poměru polohových zesílení „ $c$ “ lze vyjádřit vztahem

$$\Delta p = \frac{v_B}{2K_v} \left| \frac{1-c}{c} \right| \sin 2\alpha$$

kde	polohové zesílení souřadnice „X“ .....	$K_{vx} = K_v$
	polohové zesílení souřadnice „Y“ .....	$K_{vy} = K_v \cdot c$
	sklon programované přímky .....	$\alpha$

- Díky vlastnostem číslicových regulátorů lze dnes nastavit servopohony prakticky absolutně přesně a chyby vlivem rozdílných zesílení  $K_v$  mohou vzniknout jen hrubou nedbalostí při seřizování.

# Chyby při lineární interpolaci

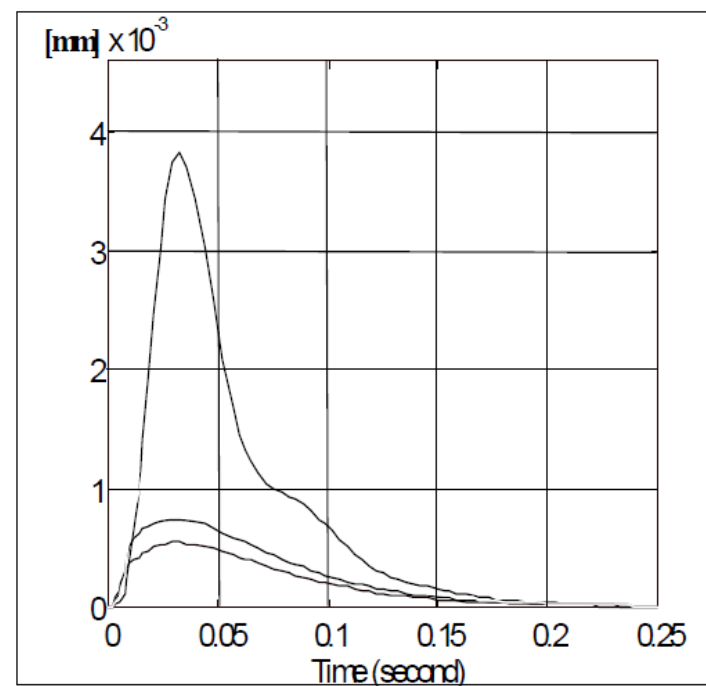
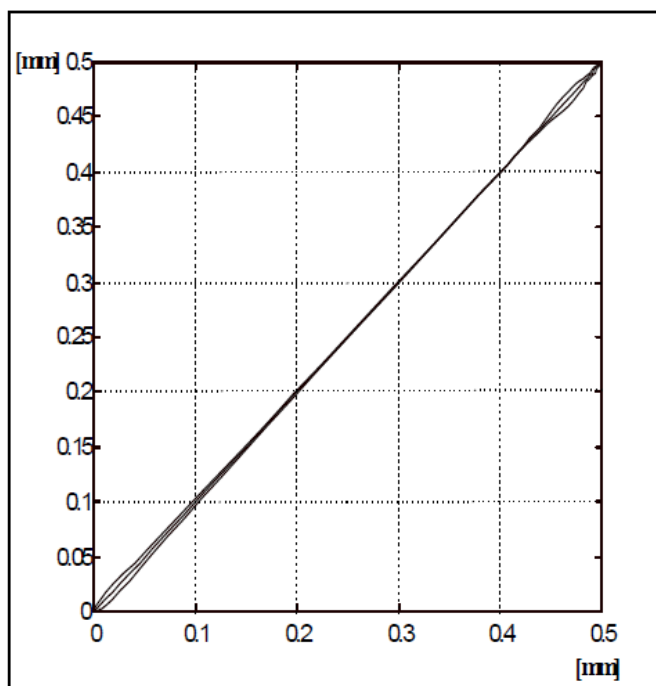
## b) Nestejná dynamika interpolujících servomechanismů

- Interpolující souřadnice zpravidla mají různé hmotnosti a/nebo tuhosti a z toho důvodu také různou dynamiku. Vysoká zrychlení při rozběhu, zastavení nebo při změně rychlosti vybudí kmity interpolujících souřadnic, a protože amplituda a fáze takto vzniklých kmitů je obecně různá, následkem toho vzniknou při rozjezdu a zastavení odchylky od přímky (v ustáleném stavu servomechanismy sledují žádanou trajektorii zcela přesně).



# Chyby při lineární interpolaci

## b) Nestejná dynamika interpolujících servomechanismů

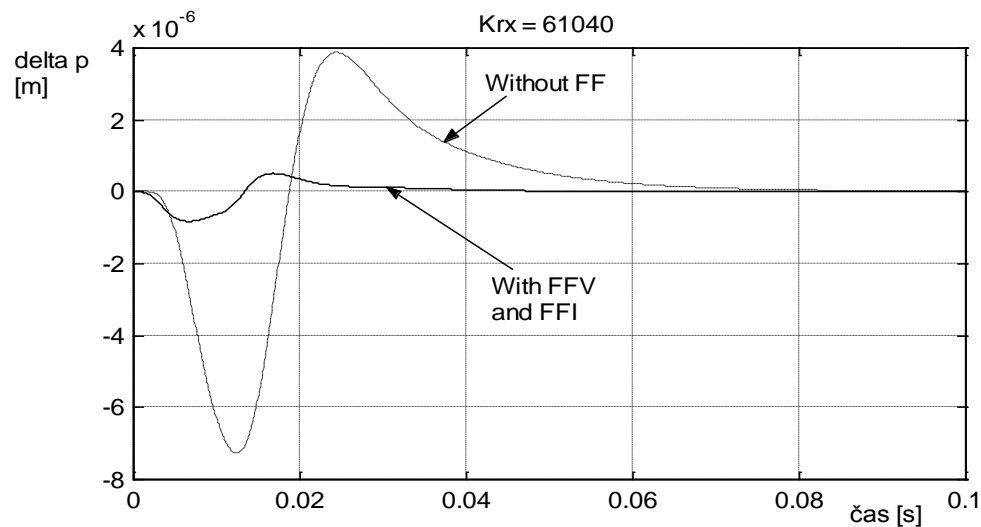


*Obr.: velmi krátká dráha (0,5 mm) projetá velmi vysokou rychlostí (120 m/min) pod úhlem 45 stupňů a při polohovém zesílení  $K_v = 30$  [1/s]. Osa „X“ je dynamicky dvakrát „rychlejší“ než osa „Y“. Vlevo - deformace dráhy, vpravo - paralelní odlehlost skutečné a ideální dráhy pro různá propustná pásma osy „X“.*

# Chyby při lineární interpolaci

## b) Nestejná dynamika interpolujících servomechanismů

- Tyto jevy lze minimalizovat správným seřízením zesílení rychlostních regulátorů interpolujících souřadnic.
- Dynamické chyby se běžně kompenzují pomocnými řídicími signály rychlosti a zrychlení (dopředná vazba, feedforward).



*Průběh paralelní odlehlosti při lineární interpolaci*

## Chyby při kruhové interpolaci

- Při kruhové interpolaci vznikají hlavně tyto chyby:
  - a) Vlivem dynamiky polohového servomechanismu.
  - b) Vlivem nestejných polohových zesílení interpolujících servomechanismů.
  - c) Vlivem nestejné dynamiky interpolujících servomechanismů.
  - d) Chyby při přechodu kvadrantů vlivem pasivních odporů.

# Chyby při kruhové interpolaci

## a) Vlivem dynamiky polohového servomechanismu

- Původ této chyby je v tom, že servomechanismy při kruhové interpolaci vykonávají harmonický pohyb. Protože polohový servomechanismus má poměrně malé propustné pásmo, které se pohybuje v rozmezí zhruba 5 až 35 Hz, při vyšších objížděcích rychlostech dochází **k zmenšování poloměru**. Chyba je největší při malých poloměrech.

$$\Delta r_0 = r_0 \left[ \frac{1}{\sqrt{(\omega/K_v)^2 + 1}} - 1 \right] \approx -\frac{v_B^2}{r_0 K_v}$$

$\Delta r_0$  [m] ..... změna poloměru interpolované křivky

$r_0$  [m] ..... poloměr interpolované křivky

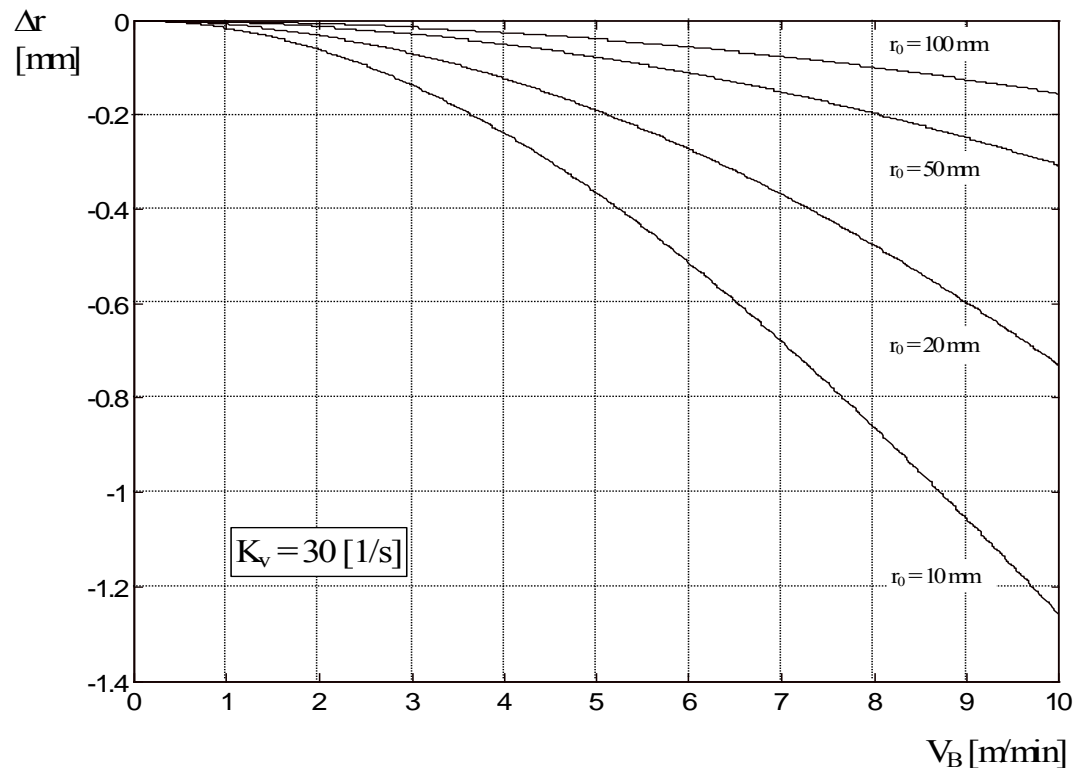
$\omega$  [rad/s] ..... úhlová rychlost objíždění poloměru  $r_0$

$K_v$  [1/s] ..... zesílení polohové smyčky

$v_B = \omega \cdot R$  [m/s] .... rychlost objíždění poloměru  $r_0$

# Chyby při kruhové interpolaci

## a) Vlivem dynamiky polohového servomechanismu



*Závislosti změny poloměru  $\Delta r_0$  na posuvové (objížděcí) rychlosti  $v_B$  a na poloměru kružnice  $r_0$*

- Tyto chyby kompenzují dopředné signály – feedforwardy (pohon má vyšší dynamiku).

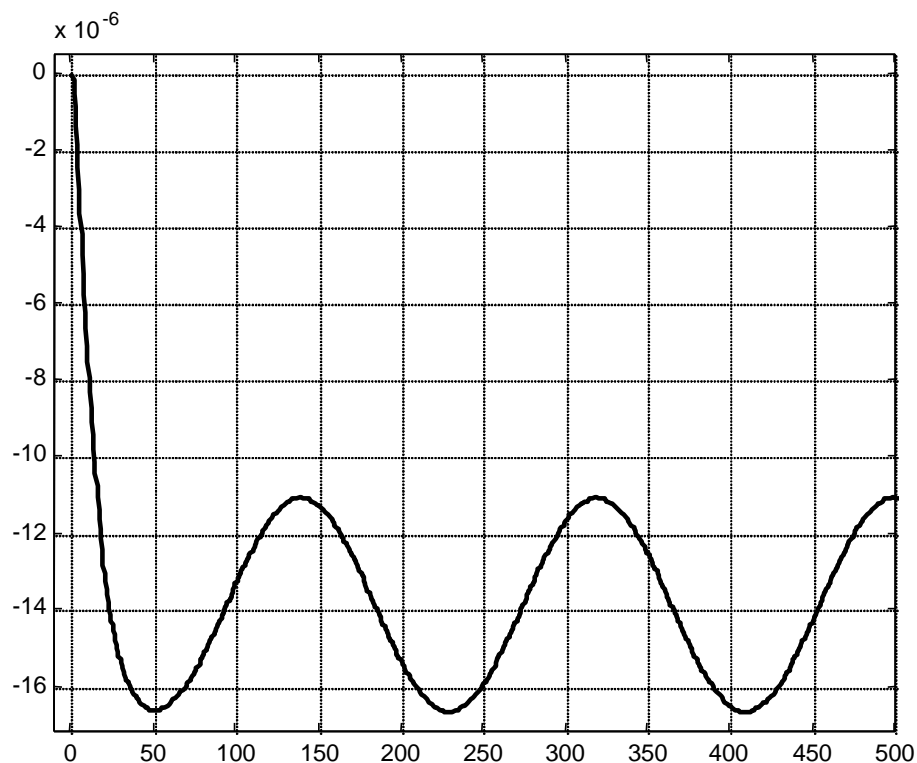
## Chyby při kruhové interpolaci

### b) Vlivem nestejných polohových zesílení interpolujících servomechanismů:

- Tato chyba by v praxi neměla vůbec přicházet v úvahu, protože nastavení stejných polohových zesílení  $K_v$  ve všech interpolujících osách patří ke zcela elementárním zásadám při seřizování pohonů NC obráběcích strojů.
- Při nastavení různých  $K_v$ , budou mít interpolující souřadnice rozdílné frekvenční charakteristiky a skutečná poloha bude sledovat žádanou harmonickou funkci se zkreslením odpovídajícím frekvenční charakteristice příslušné souřadnice.
- Budou-li frekvenční charakteristiky spolupracujících pohonů různé, **skutečný poloměr kružnice se bude periodicky měnit a místo kružnice vznikne elipsa.**

# Chyby při kruhové interpolaci

## b) Vlivem nestejných polohových zesílení interpolujících servomechanismů



*Chyba poloměru interpolované kružnice*

## Chyby při kruhové interpolaci

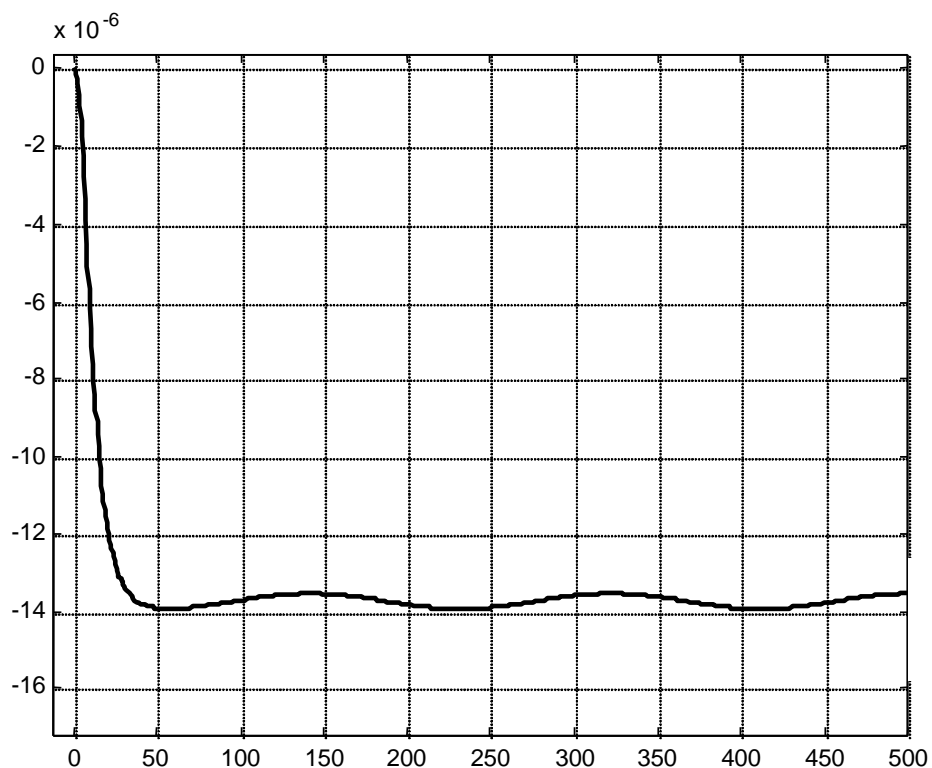
### c) Vlivem nestejně dynamiky interpolujících servomechanismů

- Vzniká vlivem nestejně dynamiky spolupracujících souřadnic – v tomto případě jde ale o dynamiku rychlostních smyček.
- Při kruhové interpolaci je pohonu zadávána žádaná poloha jako harmonická funkce. Skutečná poloha sleduje tuto harmonickou funkci se zkreslením odpovídajícím frekvenční charakteristice příslušné souřadnice. Protože frekvenční charakteristiky spolupracujících souřadnic obráběcího stroje jsou obecně různé, poloměr interpolované kružnice se periodicky mění a místo kružnice vzniká elipsa.
- Chyba je ale řádově menší než v případě b).
- Lze snadno zmenšit použitím feedforwardů.



# Chyby při kruhové interpolaci

## c) Vlivem nesterjné dynamiky interpolujících servomechanismů

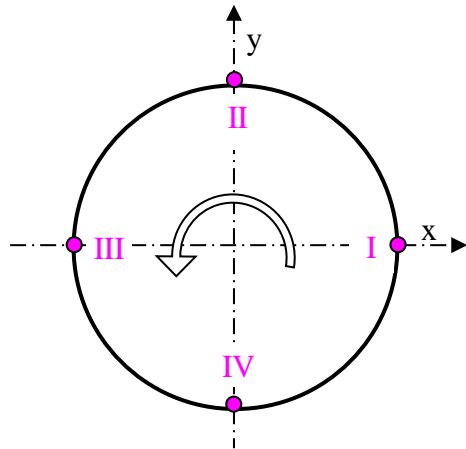


*Chyba poloměru interpolované kružnice*

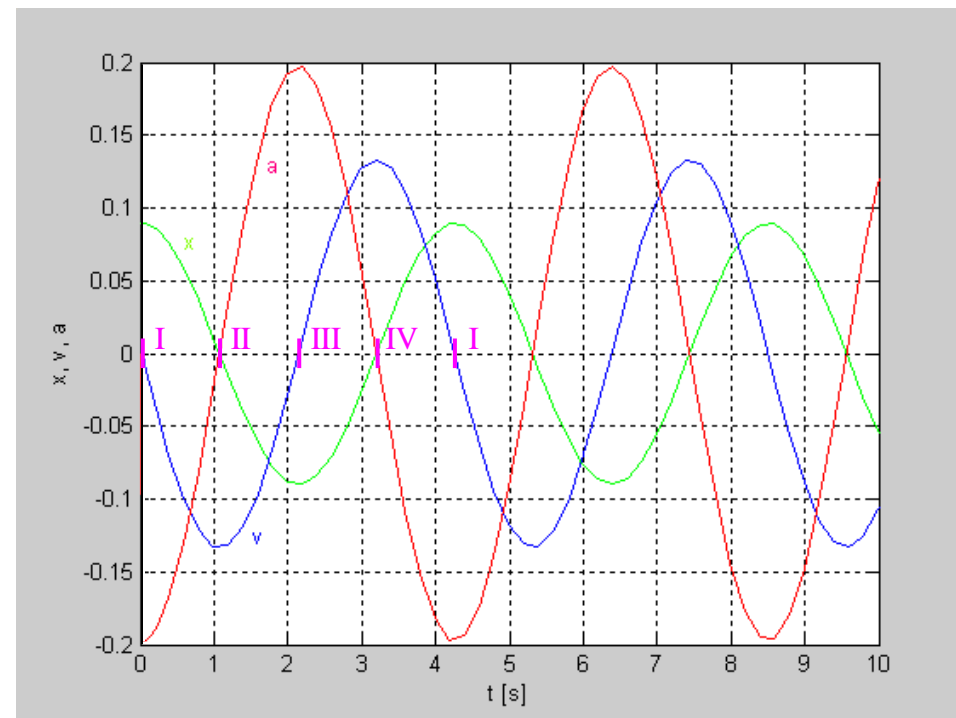
# Chyby při kruhové interpolaci

## d) Chyby při přechodu kvadrantů vlivem pasivních odporů

- Při kruhové interpolaci pohony střídavě reverzují při přechodech mezi jednotlivými kvadranty.



*Kruhová interpolace – označení kvadrantů*



*Průběh polohy, rychlosti a zrychlení během kruhové interpolace (osa X, R = 90 mm, v = 8 m/min).*

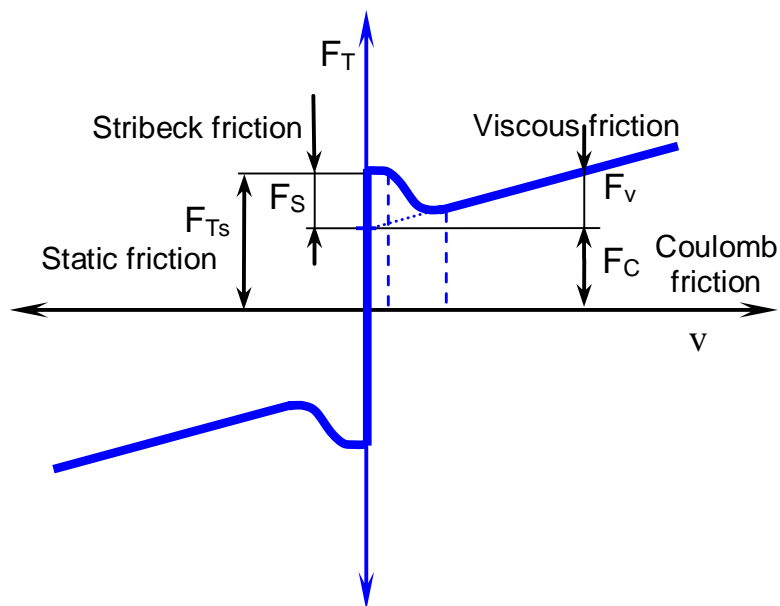
# Chyby při kruhové interpolaci

## d) Chyby při přechodu kvadrantů vlivem pasivních odporů

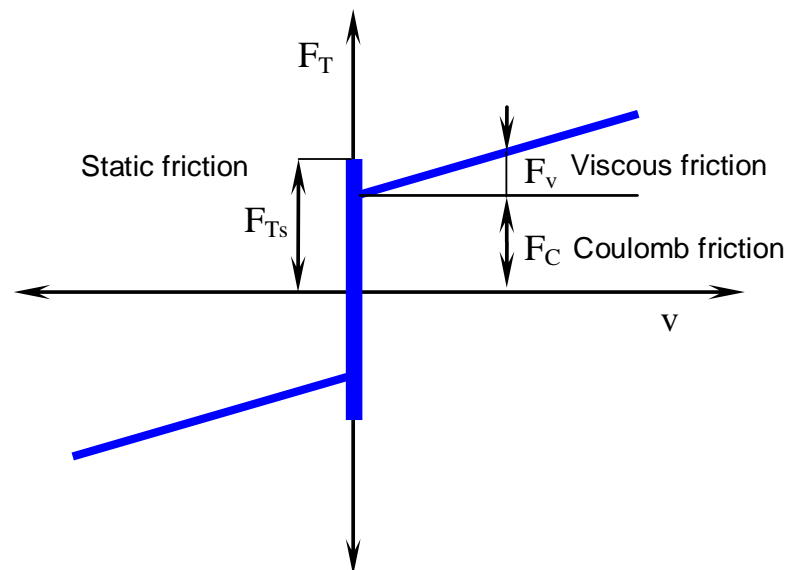
- V místě kvadrantového přechodu vždy jedna ze souřadnic mění smysl pohybu, a protože v mechanice posuvů téměř vždy působí třecí síly Coulombovského charakteru, dochází zde vlivem změny směru pohybu ke skokovým změnám třecích sil o velikost  $(2 \cdot F_T)$  a proudový regulátor musí změnit proud motorem z hodnoty  $F_T/K_m$  na  $-F_T/K_m$ .
- Tato změna neproběhne skokem a než proud dosáhne hodnoty, při kterém se servomechanismus začne pohybovat opačným směrem, uplyne určitý čas. Během této doby souřadnice, která mění smysl pohybu stojí, zatímco druhá se pohybuje maximální rychlostí. Poloměr skutečné dráhy se proto zvětší – vznikne kvadrantová chyba.

# Chyby při kruhové interpolaci

## d) Chyby při přechodu kvadrantů vlivem pasivních odporů



Průběh třecí síly v závislosti na rychlosti

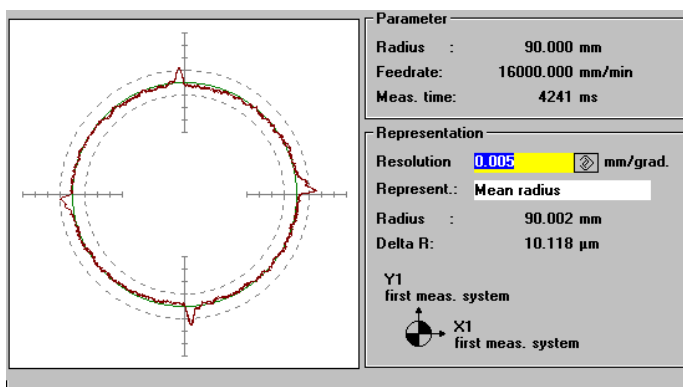


Matematický model tření

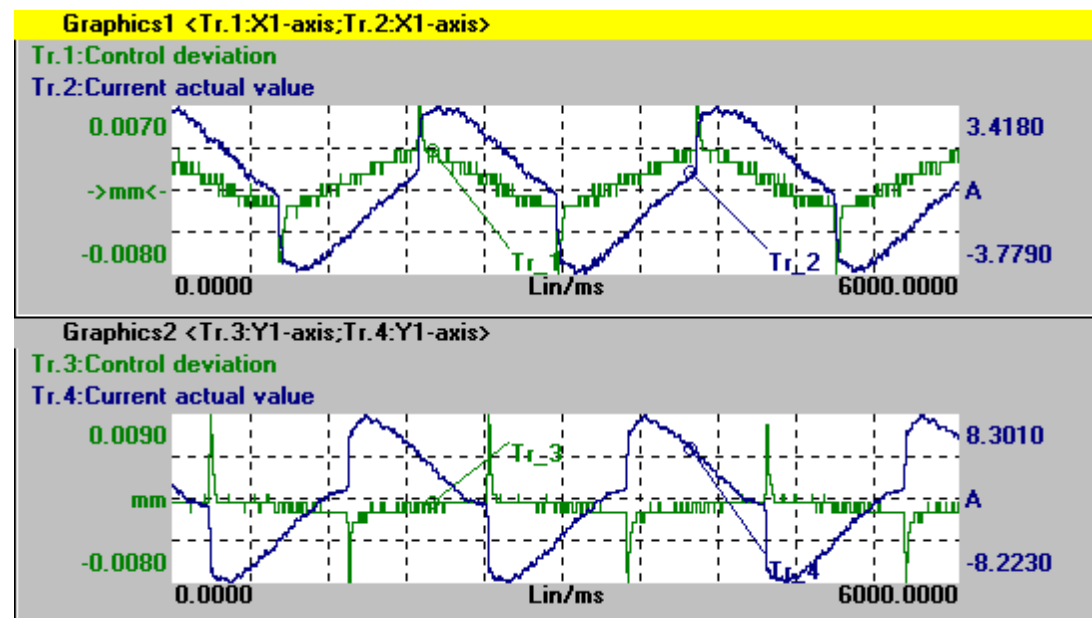
- Skoková změna třecí síly v místě reverzace je  $(2 \cdot F_{Ts})$  - (viz modely tření)

# Chyby při kruhové interpolaci

## d) Chyby při přechodu kvadrantů vlivem pasivních odporů



Výsledek testu kruhové interpolace  
(chyba je zvětšena)



Časové průběhy polohové odchylky a  
proudu při kruhové interpolaci

# Chyby při kruhové interpolaci

## d) Chyby při přechodu kvadrantů vlivem pasivních odporů

- Řešení:
  - Kompenzace – náročné seřizování na stroji - ne vždy zaručen úspěch (proměnlivé tření) .....
  - Hydrostatická uložení, která zcela odstraní Coul. charakter pasivních odporů, pasivní odpory pak mají charakter viskosního tlumení, při nulové rychlosti mají nulovou velikost a kvadrantové chyby proto v podstatě nevznikají (drahé, konstrukčně složité).
  - Vysoká dynamika pohonu (rázová dyn. poddajnost).

# Literatura

- [1] Mendřický, R.: Modelování a identifikace tření u vysoce přesných polohových servomechanismů. [Disertační práce]. Liberec 2006. TU v Liberci. Fakulta strojní.
- [2] Skalla, J.: Dynamické chyby dráhy při interpolaci NC obráběcích strojů. [Teze přednášky pro řízení ke jmenování profesorem]. Liberec 2003. TU v Liberci. Fakulta strojní.
- [3] Technická dokumentace k řídicímu systému Siemens - SINUMERIK 840D.