

Hlavní parametry mající zásadní vliv na přesnost řízení a kvalitu pohonu

Radomír Mendřický – Elektrické pohony a servomechanismy

12.8.2015



Obsah prezentace

- Požadavky na pohony
- Hlavní parametry pro posuzování kvality pohonu
 - Propustné pásmo
 - Nerovnoměrnost malých rychlostí
 - Dosažitelné polohové zesílení
 - Dynamická tuhost (poddajnost)
- Na čem závisí dynamická tuhost (poddajnost)

Na pohony jsou kladeny následující požadavky:

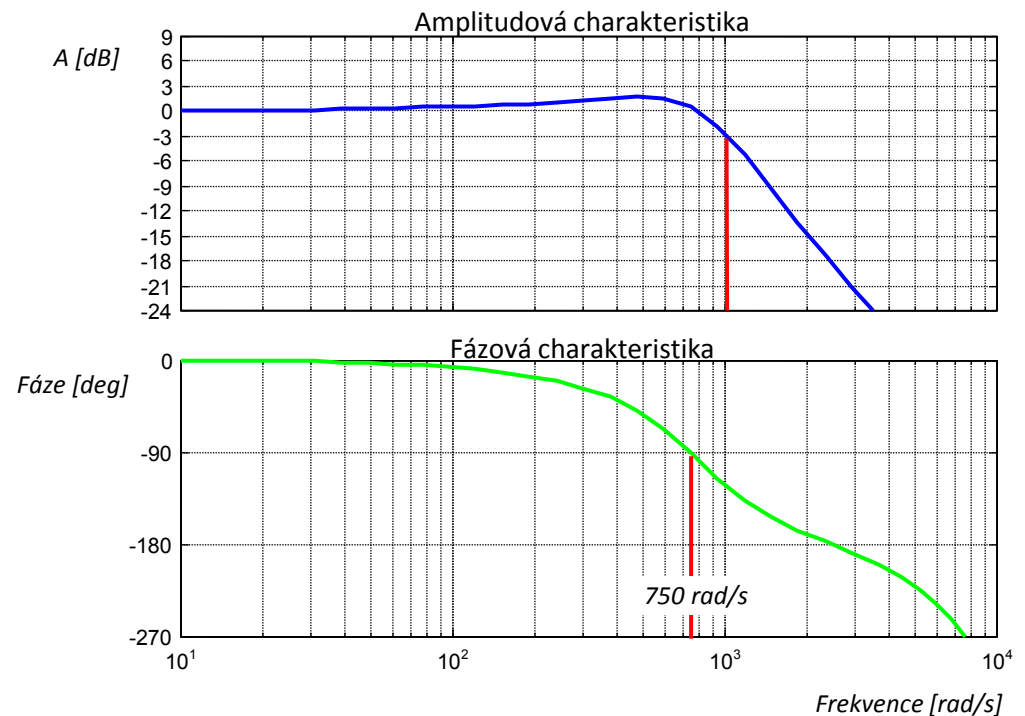
- V celém rozsahu pracovních rychlostí **vyvinout dostatečně velkou sílu** (k překonání řezných sil, zrychlujících sil a pasivních odporů).
- **Přesnost řízení polohy** (např. 1 μm).
- V celém rozsahu rychlostí a zatěžujících sil **zajistit plynulý pohyb a spojitou regulaci**.
- **Rozběh a zastavení** při skokovém zadání rychlosti **bez překmitu polohy**.
- **Vysoké zrychlení**.
-

Hlavní parametry pro posuzování vhodnosti (kvality) pohonu:

- Propustné pásmo
- Nerovnoměrnost malých rychlostí
- Dosažitelné polohové zesílení
- Dynamická tuhost (poddajnost)

Propustné pásmo:

- Je největší frekvence sinusového vstupního signálu, při kterém amplituda výstupního signálu neklesne o více než 3 dB a při které fázový posun neklesne pod -90° .
- Velikost propustného pásma tedy určuje rychlost, kterou je pohon schopen reagovat na změny vstupních a poruchových signálů.



Př.: Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika rychlostní smyčky.

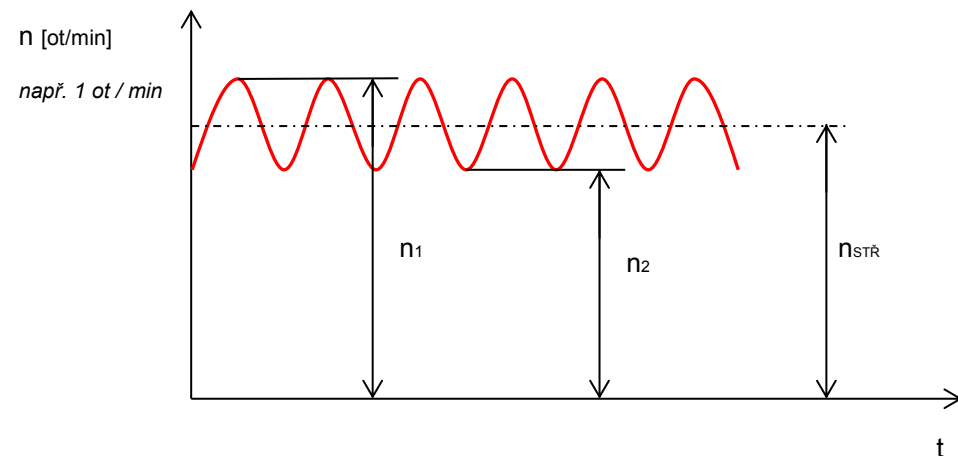
Nerovnoměrnost malých rychlostí:

- Je definována, jako poměr kolísání okamžité rychlosti ke střední rychlosti pohonu.

$$\Delta n = n_1 - n_2$$

$$n_{stř} = \frac{n_1 + n_2}{2}$$

$$\delta = \frac{\Delta n}{n_{stř}} < 0,01 \text{ (0,1)}$$

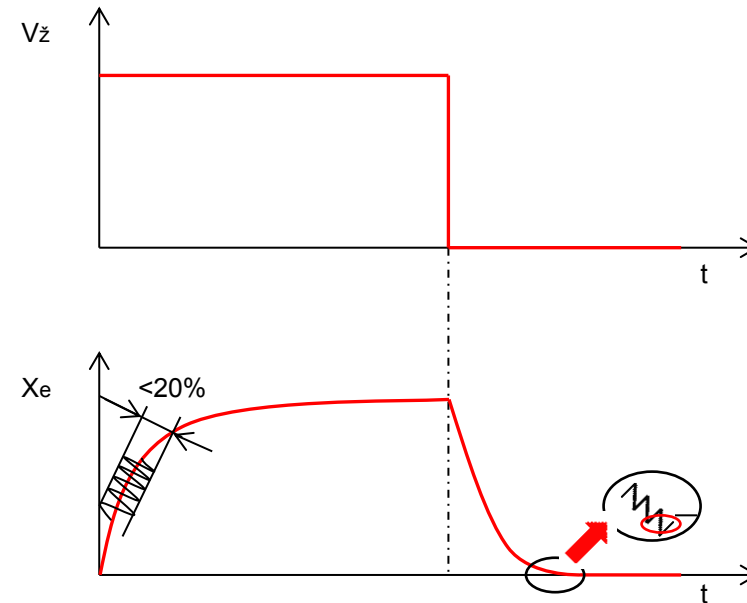


Dosažitelné polohové zesílení K_v

Je největší zesílení (K_v), při kterém v celém rozsahu pracovních posuvů při zadání skokové změny žádané rychlosti:

- a) nedochází k překmitu při zastavení
- b) obsah kmitavých složek v přechodovém ději nepřesáhne 20%

Pozn.: Malé K_v = větší dynamická chyba

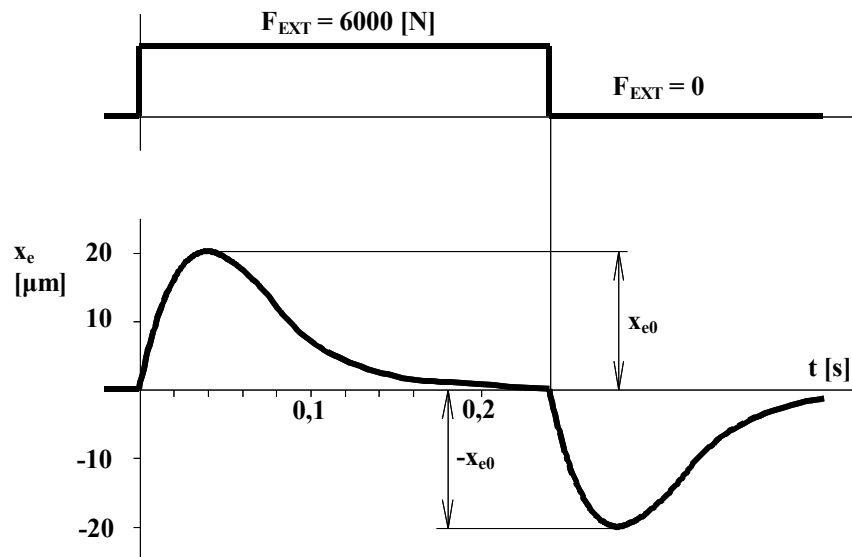


Dynamická tuhost (poddajnost)

- Pozn.: **Statická tuhost** servomechanismu je „nekonečně“ velká (poddajnost nulová). To znamená, že pokud vnější zatížení nepřesáhne maximální velikost točivého momentu resp. síly motoru, servomechanismus se po odeznění přechodového děje vyvolaného změnou zatížení vrátí do žádané polohy (polohová odchylka bude rovna nule).
- V rámci polohového servopohonu mohou tedy vzniknout pouze **dynamické odchylky** od žádané polohy, které regulátory po určitém čase (maximálně několik desetin či setin vteřiny) vyrovnají.
- Reakce servomechanismu na změnu vnějších (zatěžujících) sil a momentů pak můžeme charakterizovat dynamickou tuhostí (poddajností). Rozlišujeme rázovou a frekvenční dynamickou tuhost (poddajnost).

Rázová dynamická tuhost (poddajnost)

- Zjišťuje se z odezvy pohonu na skokovou změnu zatížení (síly, momentu).
- V praxi to může odpovídat např. rychlému najetí nástroje do řezu.



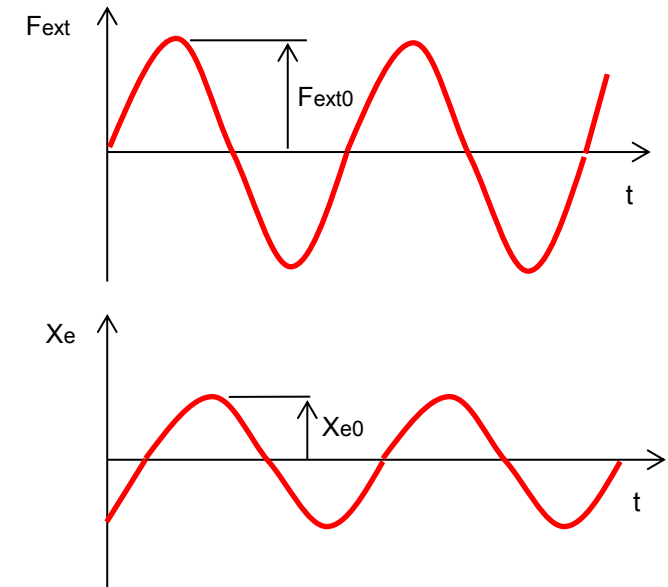
$$k_{dr} = \frac{F_{ext}}{x_{e0}}$$

Př.:

$$\begin{aligned}
 k_{dr} &= \frac{6000 \text{ [N]}}{20 \cdot 10^{-6} \text{ [m]}} = \\
 &= 3 \cdot 10^8 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right] = 300 \left[\frac{\text{N}}{\mu\text{m}} \right]
 \end{aligned}$$

Frekvenční dynamická tuhost (poddajnost)

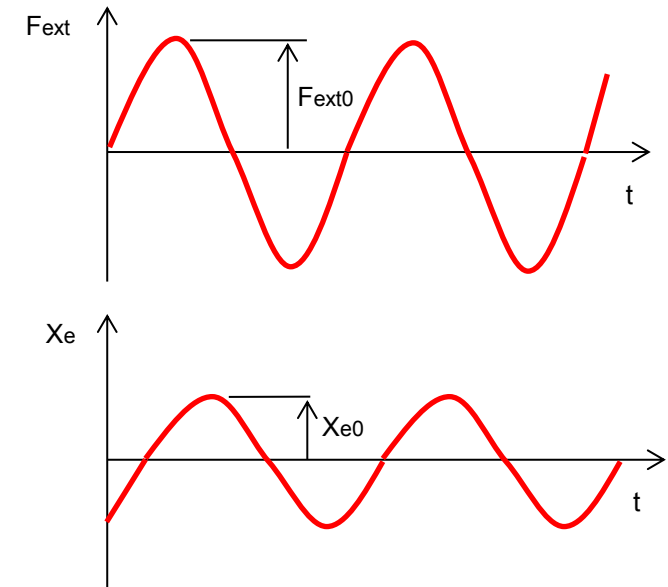
- Stanoví se z odezvy pohonu na harmonicky proměnnou zatěžující sílu.
- Tomuto stavu se v praxi blíží každé frézování nebo např. soustružení drážkového hřídele. Budicí frekvence je pak dána otáčkami vřetena a počtem zubů frézy resp. počtem drážek hřídele.
- Frekvenční dynamickou tuhost definujeme jako poměr amplitud harmonicky proměnné zatěžující síly F_{ext0} a polohové odchylky x_{e0} .



$$k_{df} = \frac{F_{ext0}}{x_{e0}}$$

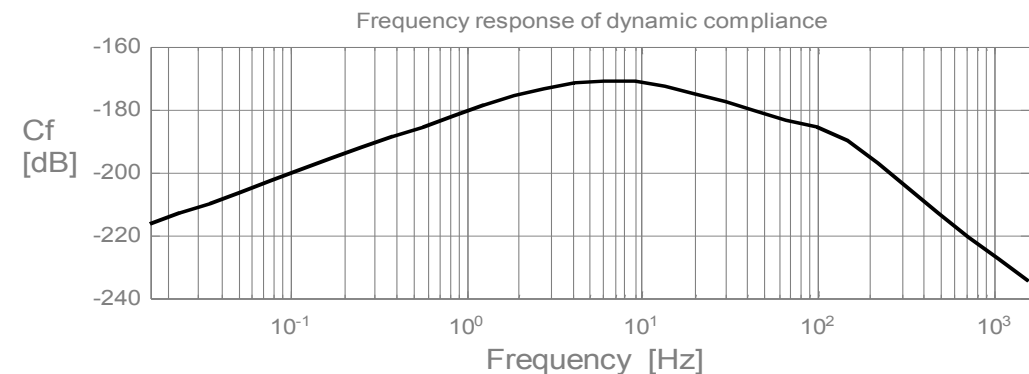
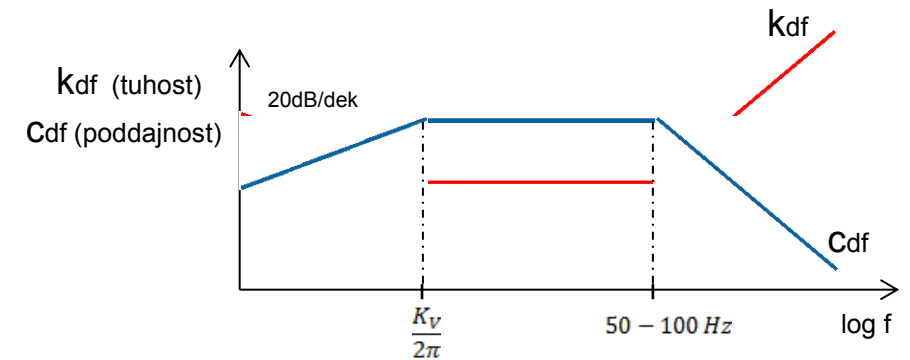
Frekvenční dynamická tuhost (poddajnost)

- Pohon při zatěžování harmonicky proměnnou silou F_{ext} reaguje tak, že polohová odchylka x_e také kmitá prakticky sinusově.
- Průběhy síly a polohové odchylky jsou vůči sobě fázově posunuty.



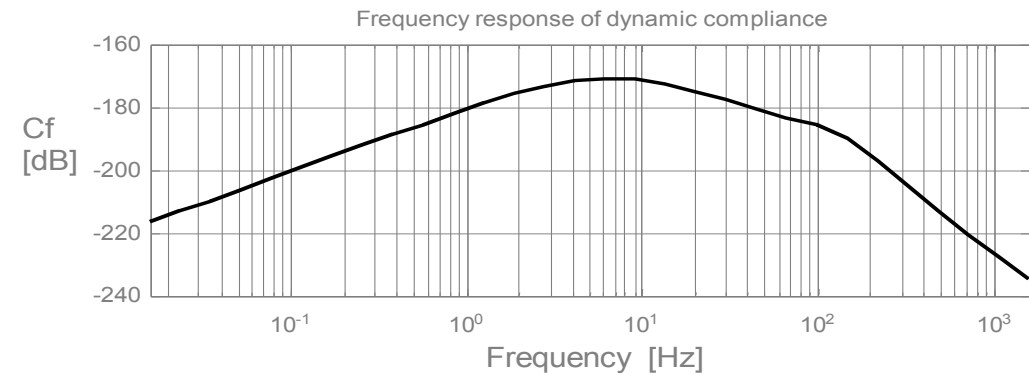
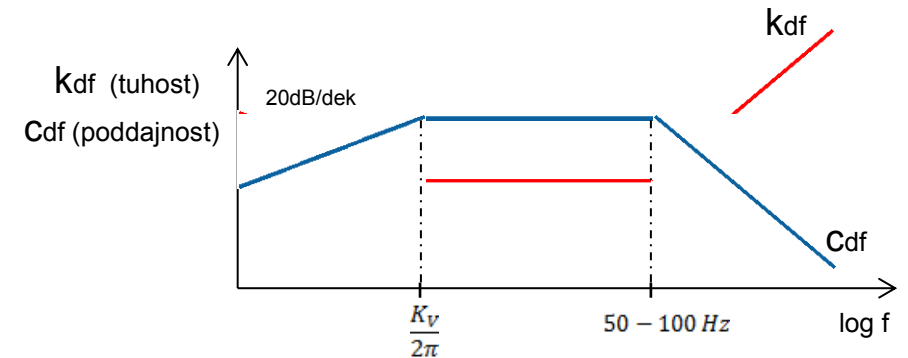
Frekvenční dynamická tuhost (poddajnost)

- Frekvenční dynamická tuhost je funkcí frekvence budicí síly a obvykle ji znázorňujeme v logaritmických souřadnicích.
- Při nízkých frekvencích budicí síly jsou polohové odchylky velmi malé a poddajnost pohonu je tedy velmi malá (statická poddajnost je nulová).



Frekvenční dynamická tuhost (poddajnost)

- s rostoucí frekvencí zatěžující síly klesá schopnost regulátorů vyrovnávat vznikající odchylky polohy a úměrně tomu roste poddajnost pohonu.
- max. dynamická poddajnost se zpravidla nalézá na frekvencích desítek Hz.
- nad touto frekvencí poddajnost pohonu opět klesá - začíná se uplatňovat vliv setrvačných hmot, které pohonu nedovolí sledovat vysoké frekvence zatěžujících sil.

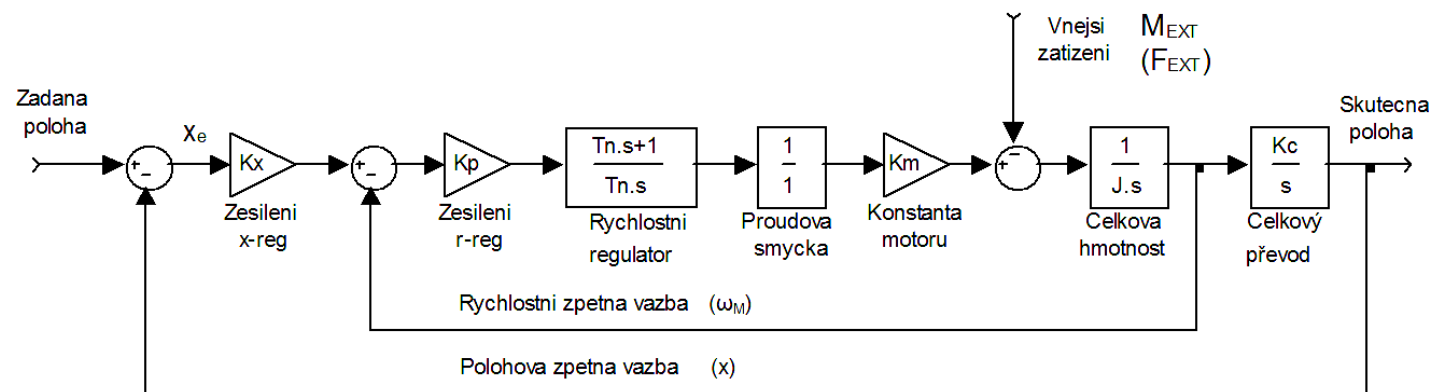


- Př.:
- pásmo frekvencí cca do 10 Hz
 - maximum v rozmezí cca 10 – 100 Hz
 - pokles nad cca 50 – 100 Hz

Na čem závisí dynamická tuhost (poddajnost)

- Pro základní analýzu dynamické poddajnosti je vhodné použít zjednodušené blokové schéma pohonu.
- Dynamika proudové smyčky je zanedbána (přenos "Proudové smyčky" je roven jedné)
- Celý servomechanismus uvažujeme jako jednohmotový, což znamená, že moment setrvačnosti "J" v bloku "Celková hmotnost" v sobě zahrnuje všechny hmoty servomechanismu redukované na motor.
- Časová konstanta přenosu regulátoru T_N je zde často charakterizována frekvencí zlomu frekvenční charakteristiky regulátoru:

$$f_N = 1/(2.\pi.T_N) \quad [Hz]$$



Na čem závisí dynamická tuhost (poddajnost)

- Lze odvodit, že dynamická poddajnost závisí na celkovém mechanickém převodu " K_C ", (lineární =1), velikosti ovládaných hmot " J ", (lineární „m“), zesílením rychlostní smyčky " K_R " a výrazu s veličinou λ , který zahrnují vliv časové konstanty rychlostního regulátoru " T_N " a polohového zesílení " K_V ".

$$c_{dr} = \frac{x_{e0}}{F_{ext}} = \frac{K_C^2}{J \cdot K_R} \lambda^{\frac{\lambda}{1-\lambda}} \quad [m / N]$$

$$kde \quad \lambda = T_N \cdot K_V \quad [1]$$

$$K_C = \frac{x}{\varphi_M} = \frac{v}{\omega_M}$$

$$K_V = K_X \cdot K_C$$

$$K_R = \frac{K_P \cdot K_m}{T_N \cdot J}$$

Celkový mechanický převod K_C

- Má výrazný vliv, neboť se vyskytuje ve druhé mocnině.

$$c_{dr} = \frac{x_{e0}}{F_{ext}} = \frac{K_C^2}{J \cdot K_R} \lambda^{\frac{\lambda}{1-\lambda}} \quad [m / N]$$

- *Dnes jsme bohužel nuceni velikost převodového čísla K_C spíše zvětšovat, protože jsou často požadovány rychloposuvové rychlosti.*

$$\text{kde} \quad \lambda = T_N \cdot K_V \quad [1]$$

Zesílení rychlostní smyčky K_R

- Určuje tzv. propustné pásmo rychlostní smyčky (frekvence f_{OR} [Hz]).

$$c_{dr} = \frac{x_{e0}}{F_{ext}} = \frac{K_c^2}{J \cdot K_R} \lambda^{\frac{\lambda}{1-\lambda}} \quad [m/N]$$

- + *Toto je jedním z důvodů pro trend zvyšování dynamiky pohonů. Jestliže před desítkami let bylo propustné pásmo rychlostní smyčky mezi 10 a 30 Hz a před lety kolem 100 Hz, dnešní pohony už dosahují i více jak 400 Hz (zejména pohony s lineárními motory).*

$$\text{kde} \quad \lambda = T_N \cdot K_V \quad [1]$$

- + *Ze vztahů vpravo je totiž patrné, že dynamická poddajnost se snižuje s druhou mocninou velikosti frekvence propustného pásma rychlostní smyčky.*

$$\underline{K_R = (2 \pi f_{OR})^2 \quad [1/s^2]}$$

Hmotnost mechaniky J (m)

- Má příznivý vliv na dynamickou poddajnost.
- *Zvyšování momentu setrvačnosti pro zlepšení poddajnosti je však u nových strojů pro technologii HSC vyloučena. Se zvýšením rychlostí je nutné zvýšit také zrychlení a to naopak nutí konstruktéry navrhovat lehčí konstrukce, aby nebylo nutné používat motory s příliš velkými točivými momenty resp. tažnými silami .*

$$c_{dr} = \frac{x_{e0}}{F_{ext}} = \frac{K_C^2}{J \cdot K_R} \lambda^{\frac{\lambda}{1-\lambda}} \quad [m / N]$$

$$\text{kde} \quad \lambda = T_N \cdot K_V \quad [1]$$

Polohové zesílení K_V a čas. konst. rychlostního regulátoru T_N

- *Poddajnost se zmenšuje s rostoucím K_V - nejde ale o úměrnost – desetinásobné zvýšení K_V sníží dynamickou poddajnost jen asi třikrát. Hodnota výrazu s veličinou λ dosti výrazně klesá s klesající frekvencí f_N (to znamená s rostoucí časovou konstantou T_N). Při tomto poklesu hodnoty výrazu s veličinou λ ale současně (a rychleji) klesá zesílení rychlostní smyčky K_R , a proto se výrazně zpomalují reakce regulace pohonu, a výsledkem je zhoršení poddajnosti. Poddajnost tedy nelze snížit zmenšením f_N .*

$$c_{dr} = \frac{x_{e0}}{F_{ext}} = \frac{K_C^2}{J \cdot K_R} \lambda^{\frac{\lambda}{1-\lambda}} \quad [m / N]$$

$$\text{kde} \quad \lambda = T_N \cdot K_V \quad [1]$$

Porovnání různých pohonů

- Příklad možnosti pohonů z hlediska dynamické poddajnosti (pro servomechanismus s celkovým momentem setrvačnosti $0,05 \text{ kg.m}^2$ resp. s hmotností 250 kg).

Typ pohonu	Parametry polohové a rychlostní smyčky: Zesílení / propustné pásmo / frekvence zlomu	Rázová dynamická poddajnost	Špička polohové odchylky po skoku síly 6000 N	Doba poklesu polohové odchylky pod $0,5 \mu\text{m}$
	$K_v [1/s] / f_{OR} [\text{Hz}] / f_N [\text{Hz}]$	$C_R [m/N]$	$x_{e0} [\mu\text{m}]$	$t_d [s]$
Klasický rotační pohon (r. 1990) přímo spojený se šroubem 10mm/ot	30 / 90 / 10	$3,67 \cdot 10^{-9}$	22	0,17
Vysoce dynamický rotační pohon přímo spojený se šroubem 20 mm/ot	50 / 250 / 20	$3,83 \cdot 10^{-9}$	23	0,09
Vysoce dynamický rotační pohon přímo spojený se šroubem 50 mm/ot	50 / 250 / 20	$23,3 \cdot 10^{-9}$	140	0,13
Lineární pohon	150 / 250 / 25	$21,7 \cdot 10^{-9}$	130	0,09

Shrnutí

- Snížení dynamické poddajnosti je možné zvětšením propustného pásma rychlostní smyčky (tj. zvětšení zesílení K_R) při maximální možné hodnotě frekvence konce integrace f_N rychlostního regulátoru (minimum časové konstanty T_N).
- Zvětšování jak propustného pásma tak frekvence f_N je ovšem omezeno stabilitou rychlostní smyčky, na kterou má vliv jednak kvalita mechaniky pohonu (tuhost, vlastní frekvence, tlumení a nelinearity), jednak propustné pásmo proudové smyčky.

→ zhoršování poddajnosti vlivem užívání větších převodů K_C lze kompenzovat zlepšováním dynamiky pohonu - zvětšováním propustného pásma rychlostní smyčky (zvyšování zesílení rychlostní smyčky K_R)

Literatura

- [1] Skalla, J.: The Feed Drive Dynamics With Respect To Servomechanism Precision. In Machine tools, Automation and robotics in mechanical engineering, MATAR PRAHA 2004. 21.-22.9.2004. ISBN 80-903421-3-2