FAKULTA STROJNÍ ČVUT V PRAZE

Tlumení hydrostatických vedení obráběcích strojů

Ing. Tomáš Lazák, Ph.D. a Ing. Eduard Stach, Ph.D.

18.09.2024

www.rcmt.cvut.cz

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE | FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení | RCMT

Horská 3 | 128 00 Praha 2 | Česká republika | tel.: +420 221 990 914 | email: info@rcmt.cvut.cz

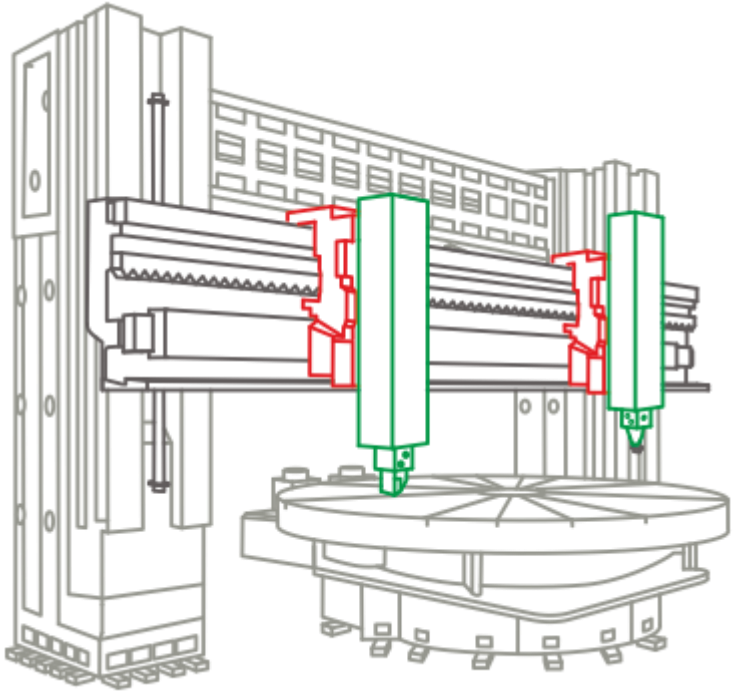
RCMT

Obsah

- Úvod
- Motivace k řešení tlumení
- Tlumení hydrostatických vedení
- Modely tlumení hydrostatických kapes
- Propojení modelu HS s mechanickou stavbou
- Přístup k návrhům tuhosti a tlumení spojů pohybových os
- Verifikace modelů tuhosti a tlumení hydrostatiky měřením
- Optimalizace návrhů hydrostatických vedení z hlediska tlumení a tuhosti
- Shrnutí

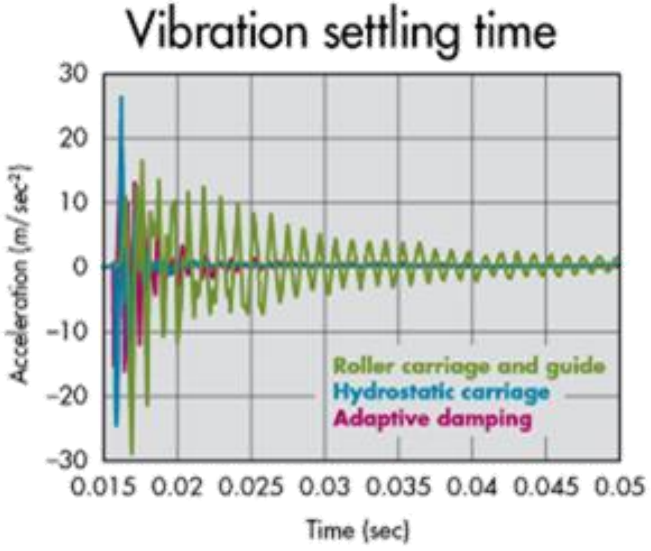
Aktuální stav v problematice hydrostatických vedení

- HS vedení je základní typ vedení obráběcích strojů
- Založena na neustálé dodávce hydraulického oleje mezi vodící plochy
- Počátky: 60. – 70. léta 20. století
- Velmi malý součinitel tření
- Vysoká životnost, únosnost, tuhost a tlumení
- Komplikovaná konstrukce, náročná výroba, údržba a provoz

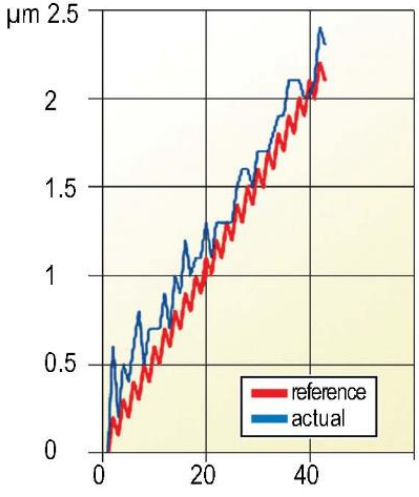


Hydrostatická (HS) vedení Požadavky v oboru obráběcích strojů (OS)

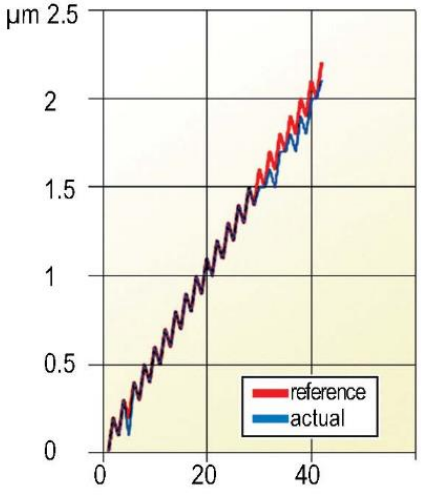
- **Základní funkční požadavky na HS vedení OS**
  1) Plynulý pohyb
  2) Vysoká únosnost
  3) Vysoká tuhost
  4) **Vysoké tlumení**
  5) Vysoká přesnost
  6) Nízké pasivní odpory (f = 10^{-4} to 10^{-5}):
     - 10 - 100x nižší než valivá vedení
     - 1000 - 10000x nižší než kluzná vedení
  7) Vysoká životnost (vodicí plochy se nedotýkají, ani při nulové rychlost – teoreticky nulové opotřebení)



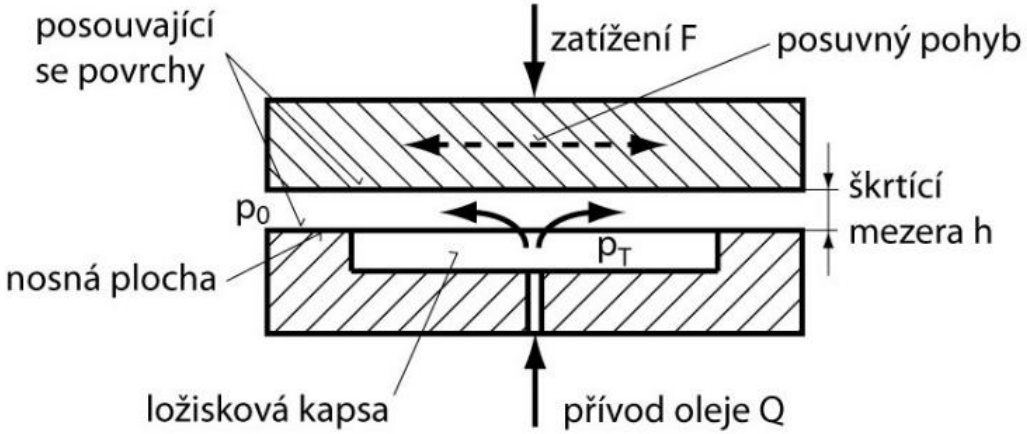
Comparison motion smallest increment 1/10 µm: Linear drives with precision guideways



Comparison motion smallest increment 1/10 µm: Hydrostatic axis with hydrostatic drives

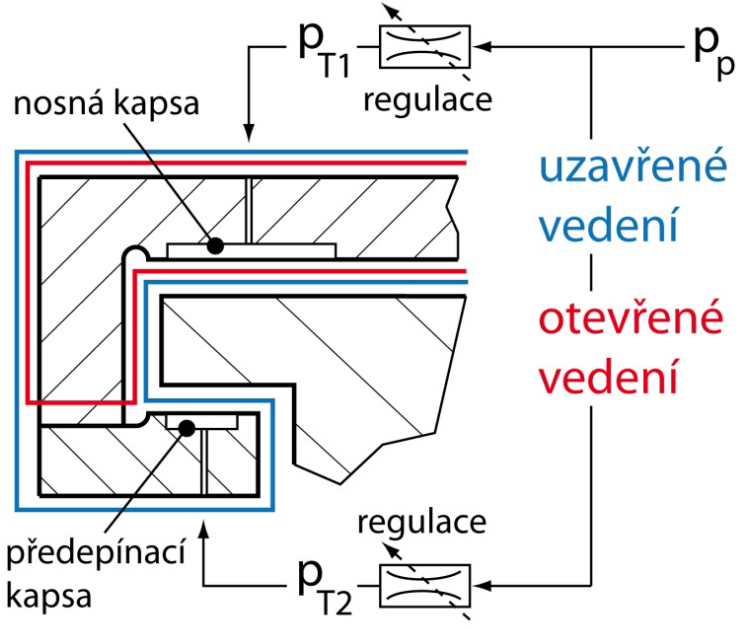


Hydrostatická vedení



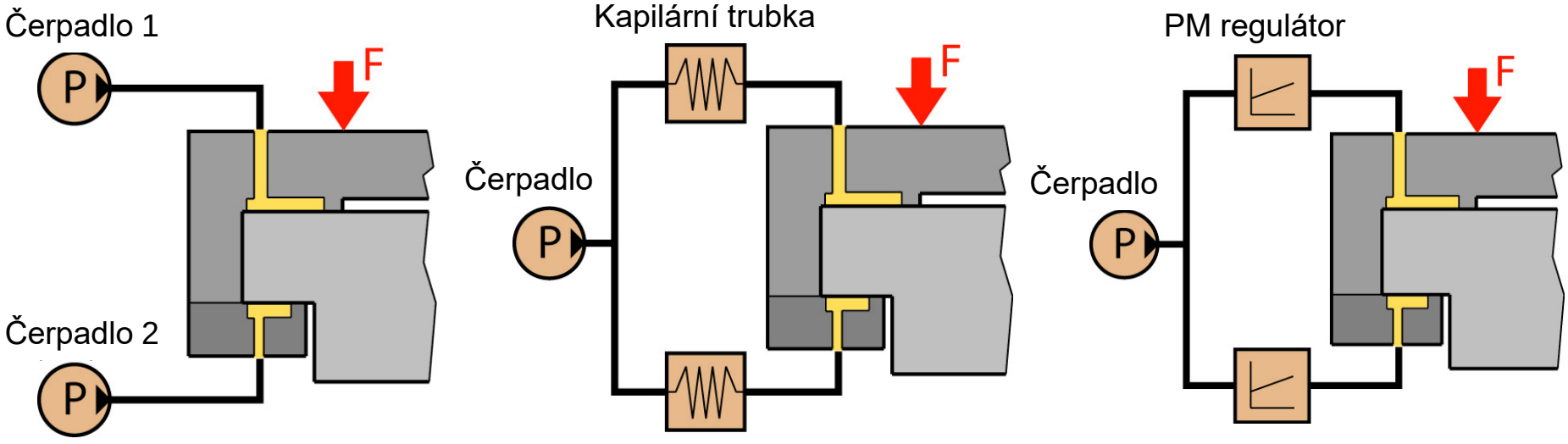
- Hydrostatická vedení se skládají z:
  - Hydrostatická kapsa
  - Vodící plocha vedení
  - Regulace průtoku

- Hydrostatická vedení jsou používána ve většině případů jako uzavřená s předpětím. V ojedinělých případech jako vedení otevřená bez předpětí.



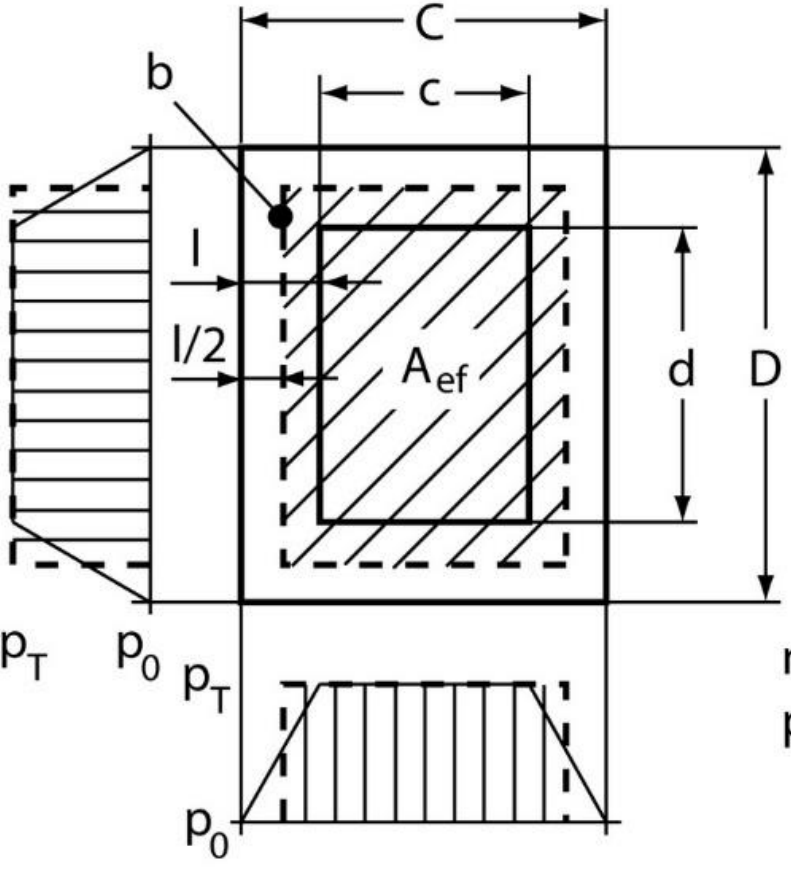
Hydrostatická vedení a regulace průtoku

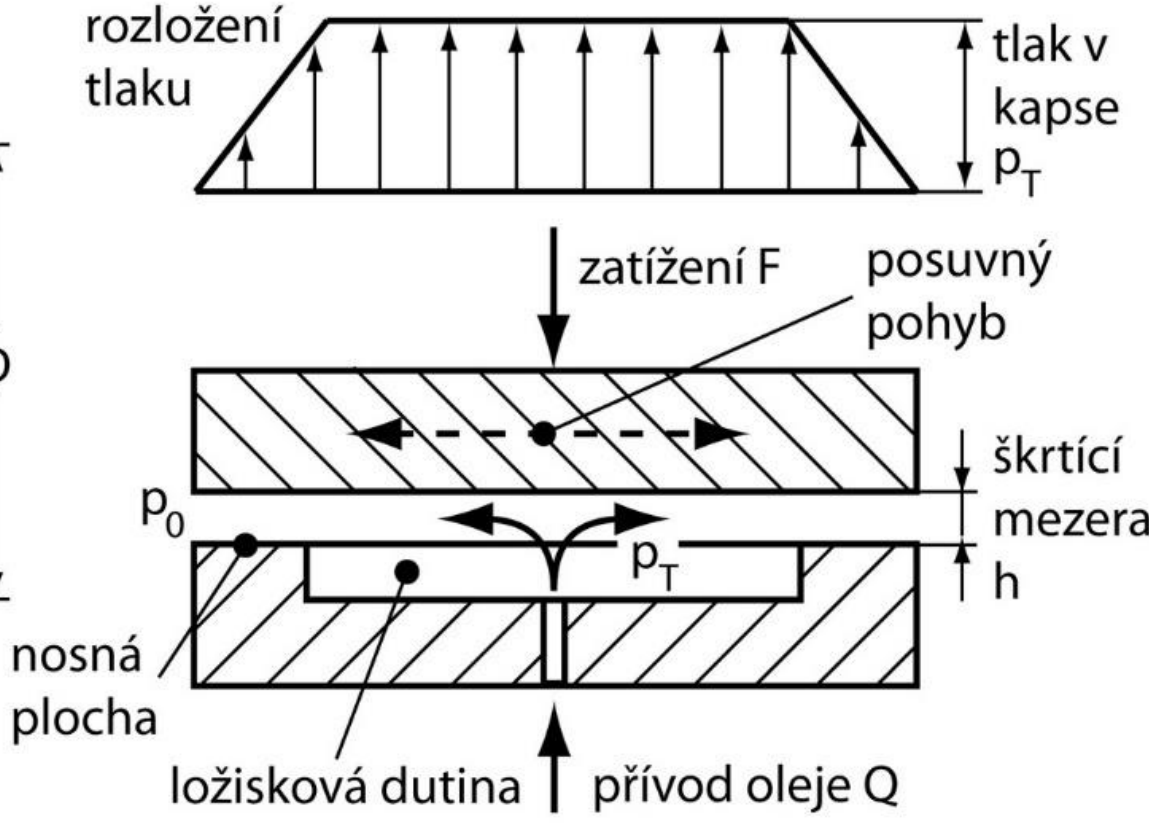
- Regulace konstantním průtokem (Q = *konst.*):
  - Dělič průtoku
  - Jedno čerpadlo pro každou kapsu
- Regulace odporem(p_p = *konst.*):
  - Konstantní odpor (kapilární trubka, …)
  - Regulace odporem s progresivní charakteristikou (PM regulátor)



Princip funkce HS kapsy

- Neustálý přísun hydraulického oleje do HS kapsy
- Hydraulický odpor lemů brání oleji v odtékání a dochází k nárůstu tlaku
- Tlak v dutině působí na efektivní plochu a tak vyvodí reakční sílu na zatížení silou F

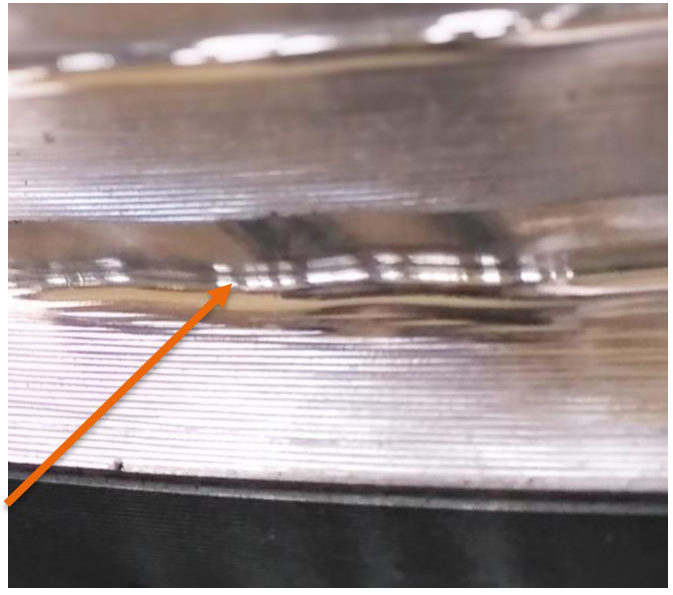




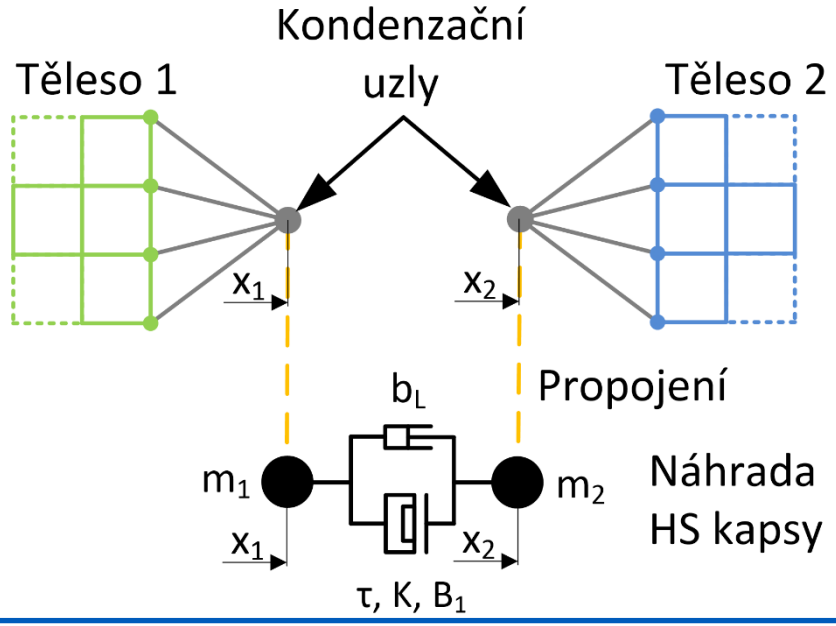
Motivace pro výzkum tlumení HS vedení

- Požadavek na zvyšování produktivity a dalších užitných vlastností OS
  - Požadavek nízké dynamické poddajnosti
    - Požadavek na vysoké tlumení
- Potřeba **prediktivně modelovat dynamické chování** stroje
  - Trend lokálního modelování tlumení
  - Vysoký potenciál HS vedení

Ukázka nestability



Propojení těles náhradou HS kapsy



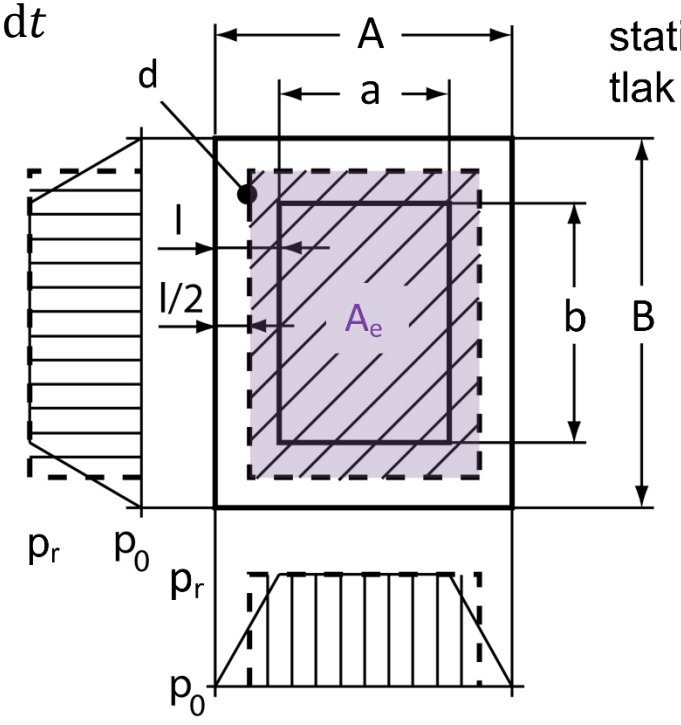
Tlumení hydrostatické kapsy s kapilárním regulátorem

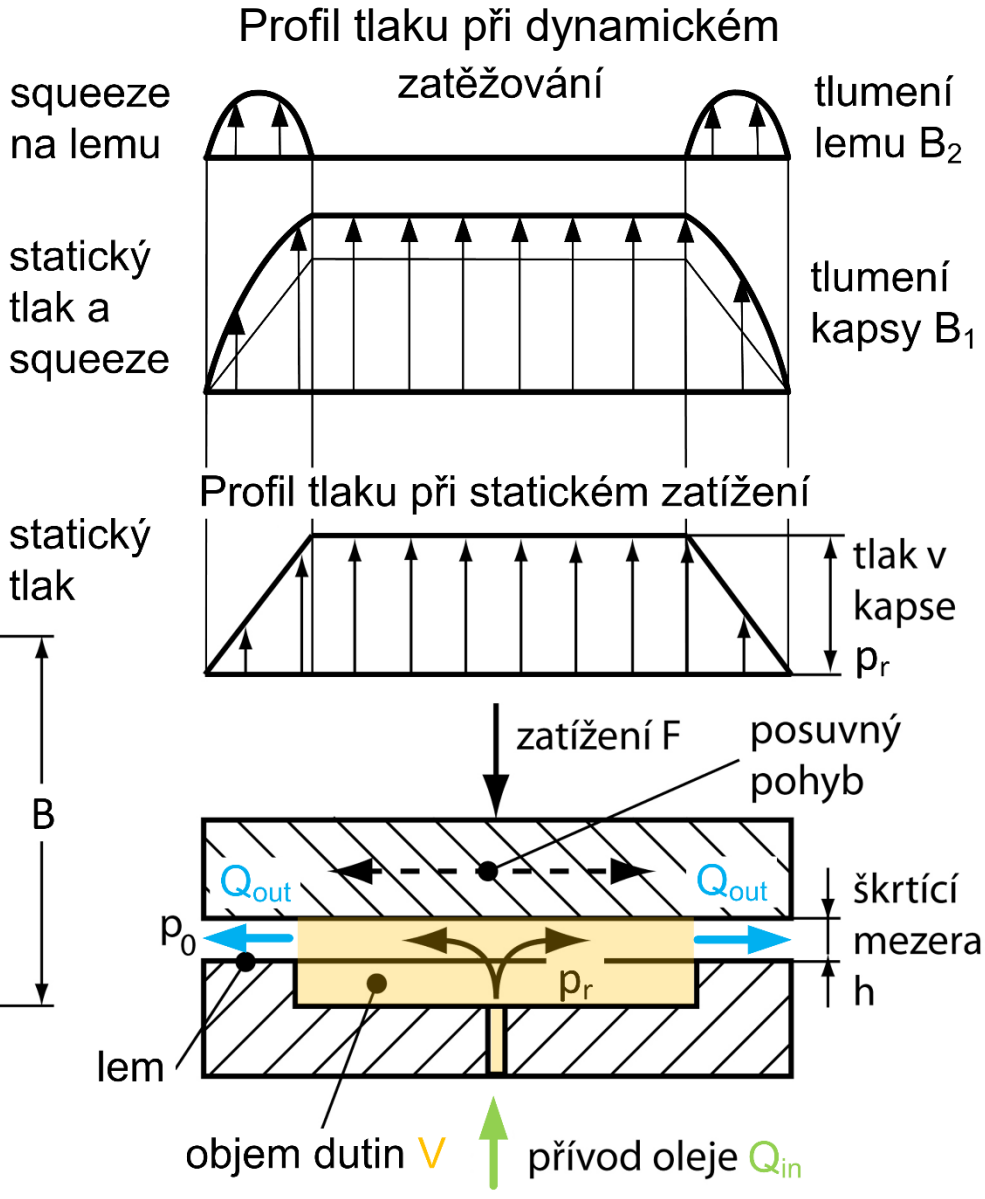
$$Q_{\text{in}} = \frac{p_{\text{p}} - p_{\text{r}}}{\mu K_{\text{C}}}$$

$$Q_{\text{out}} = \frac{p_{\text{r}}}{R_{\text{K}}} = p_{\text{r}} \frac{\bar{B} h^3}{\mu}$$

$$Q_{\text{c}} = \frac{V}{E_{\text{f}}} \frac{\mathrm{d}p_{\text{r}}}{\mathrm{d}t}$$

$$Q_{\text{sq}} = A_{\text{e}} \frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}$$





Tlumení hydrostatické kapsy s kapilárním regulátorem

- Vychází se z bilance průtoku HS kapsou

$$Q_{\mathrm{in}} = Q_{\mathrm{out}} + Q_{\mathrm{sq}} + Q_{\mathrm{c}}$$

- Pro dynamické namáhání a malé výchylky

$$\frac{\mathrm{d}Q_{\mathrm{in}}}{\mathrm{d}p_{\mathrm{r}}} p = \frac{\partial Q_{\mathrm{out}}}{\partial p_{\mathrm{r}}} p + \frac{\partial Q_{\mathrm{out}}}{\partial h}\, h + A_{\mathrm{e}} \frac{dh}{dt} + \frac{V}{E_{\mathrm{f}}} \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}$$

- Po provedení vyznačených operací, úpravách a Laplaceově transformaci obdržíme přenos olejového filmu

$$G_{\mathrm{OF}}(s) = \frac{x(s)}{F(s)} = \frac{\frac{\bar{B}\, h_0^3}{\mu} - \frac{1}{\mu K_{\mathrm{C}}} + \frac{V}{E_{\mathrm{f}}} s}{3 p_{\mathrm{r}} A_{\mathrm{e}} \frac{\bar{B} h_0^2}{\mu} + A_{\mathrm{e}}^2 s}$$

- Po dalších úpravách lze vyjádřit frekvenčně závislou tuhost $K(\omega)$ a tlumení $B_1(\omega)$

Tlumení hydrostatické kapsy s kapilárním regulátorem

- Frekvenčně závislá tuhost

$$K(\omega) = \frac{\frac{3A_e p_r \bar{B}\, h_0^2}{\mu}\left(\frac{1}{\mu K_C} + \frac{\bar{B}\, h_0^3}{\mu}\right) + \frac{V A_e^2\, \omega^2}{E_f}}{\left(\frac{1}{\mu K_C} + \frac{\bar{B}\, h_0^3}{\mu}\right)^2 + \frac{V^2 \omega^2}{E_f^2}}$$

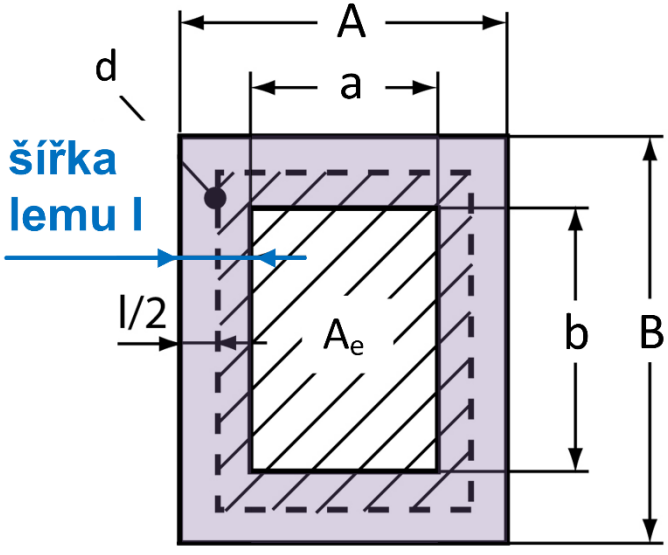
- Frekvenčně závislé tlumení

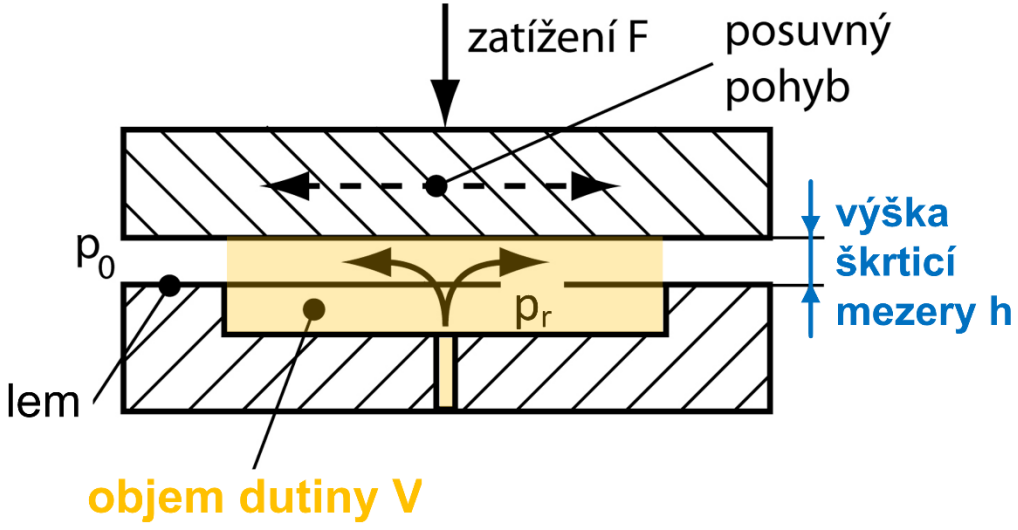
$$B_1(\omega) = \frac{A_e^2\left(\frac{1}{\mu K_C} + \frac{\bar{B}\, h_0^3}{\mu}\right) - \frac{3A_e p_r \bar{B}\, h_0^2}{\mu}\frac{V}{E_f}}{\left(\frac{1}{\mu K_C} + \frac{\bar{B}\, h_0^3}{\mu}\right)^2 + \frac{V^2 \omega^2}{E_f^2}}$$

Nejvhodnější parametry pro optimalizaci tlumení

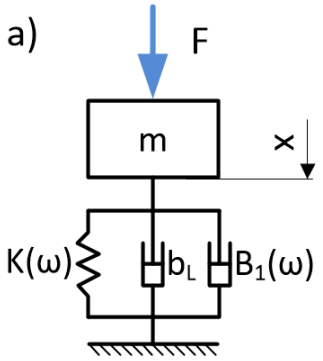
Parametry s nejvyšším vlivem na tlumení **vhodné pro optimalizaci** jsou

- **Stlačitelnost kapaliny** v dutině kapsy a potrubí mezi regulátorem a kapsou
  - Daná modulem pružnosti kapaliny E_f a **objemem dutiny V**
- **Viskozita oleje μ**
- **Výška škrticí mezery h**
- **Šířka lemu l**
- Vliv dalších parametrů je patrný z odvozených rovnic





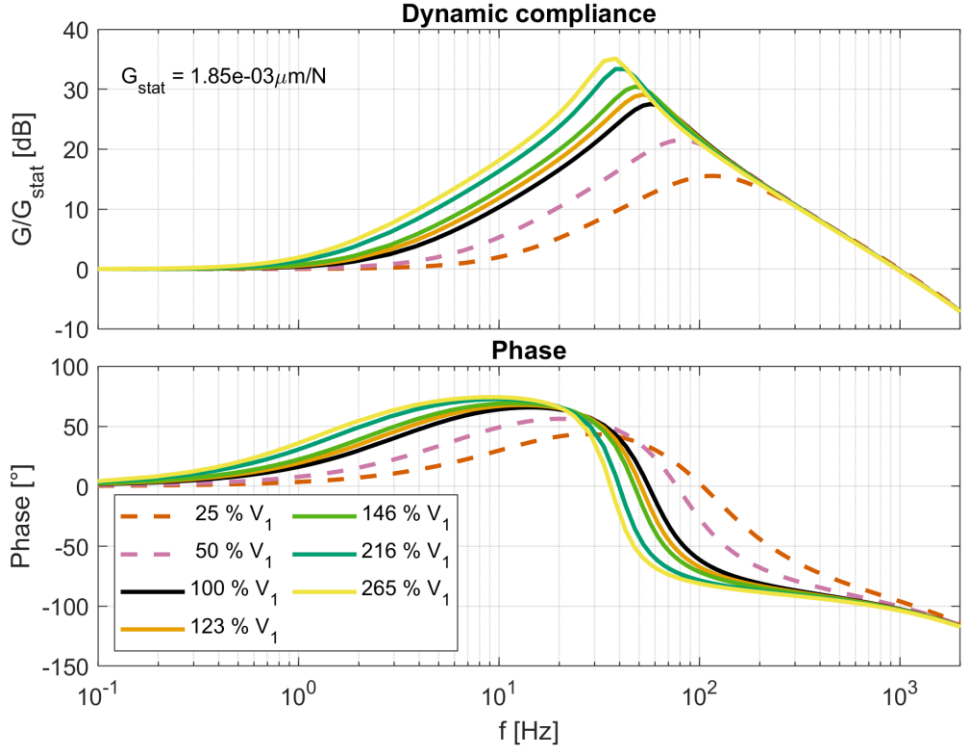
Propojení s mechanickou strukturou



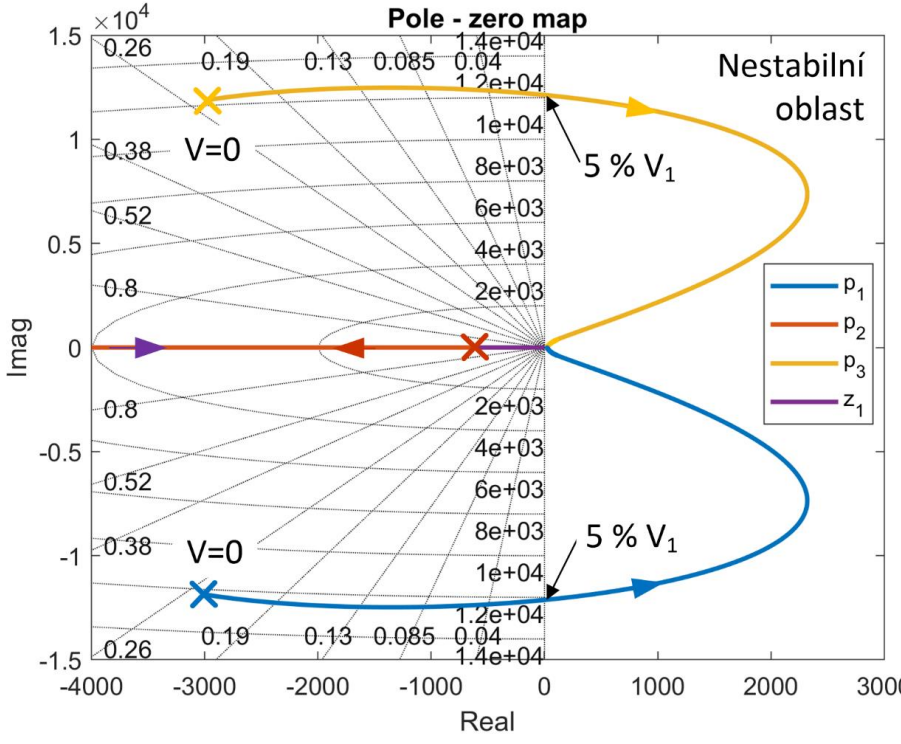
Dynamická poddajnost hmoty uložené pomocí HS vedení

$$G(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + i_K\left(b_L + B_1(\omega)\right)s + i_K K(\omega)}$$

Dynamická poddajnost

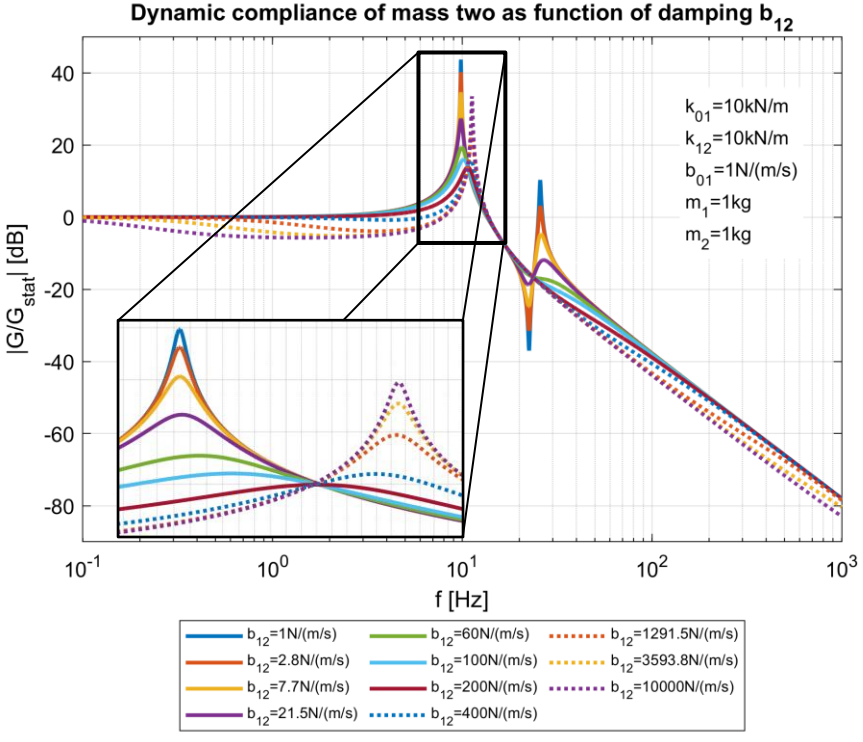


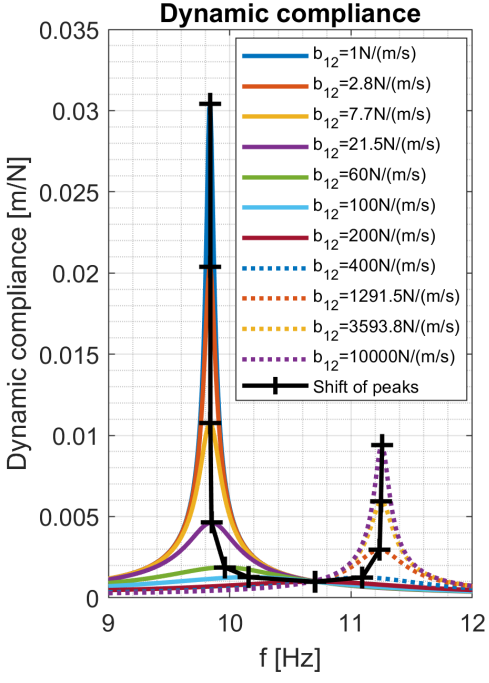
Vyšetření stability

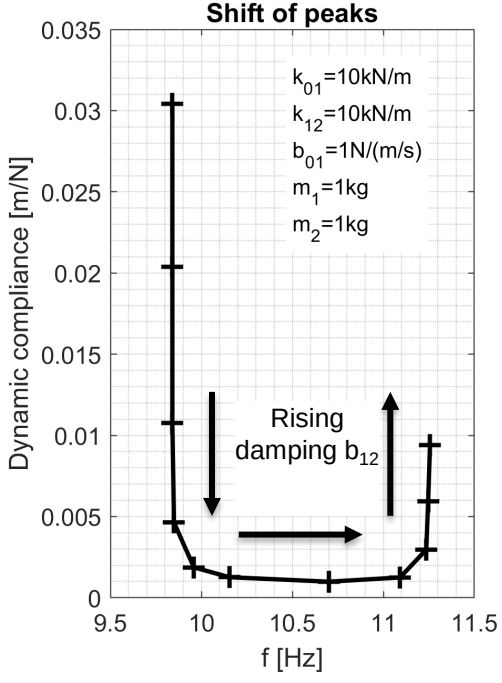


Přístup k návrhům tuhosti a tlumení pohybových os

- Vliv lokální tuhosti a tlumení HS vedení na dynamickou poddajnost na nástroji.
- Jak správně navrhovat tuhost a tlumení HS vedení ve vazbě na nosnou strukturu stroje?
- **Správná volba tuhosti a tlumení spojů je klíčová pro minimalizaci statické a dynamické poddajnosti na nástroji.**
- **Maximalizace lokální tuhosti a tlumení spojů není vždy prostředkem k minimalizování dynamické poddajnosti na nástroji. Je vhodné nalézt optimální tuhost a tlumení spojů (HS vedení).**

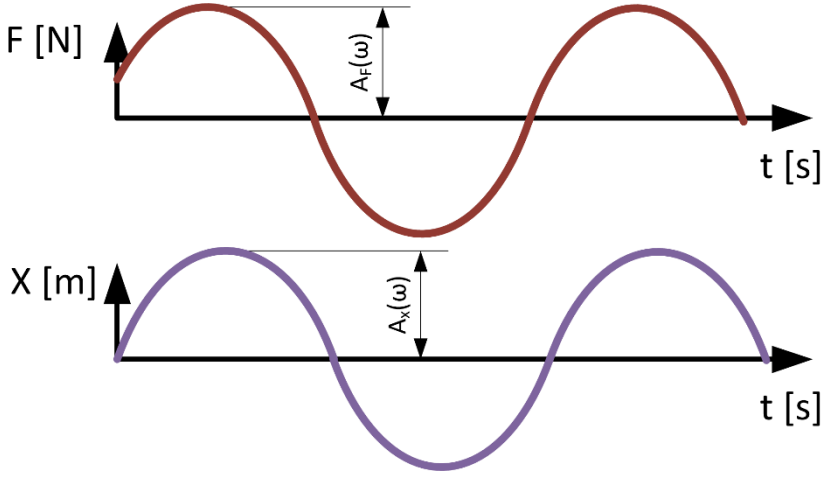




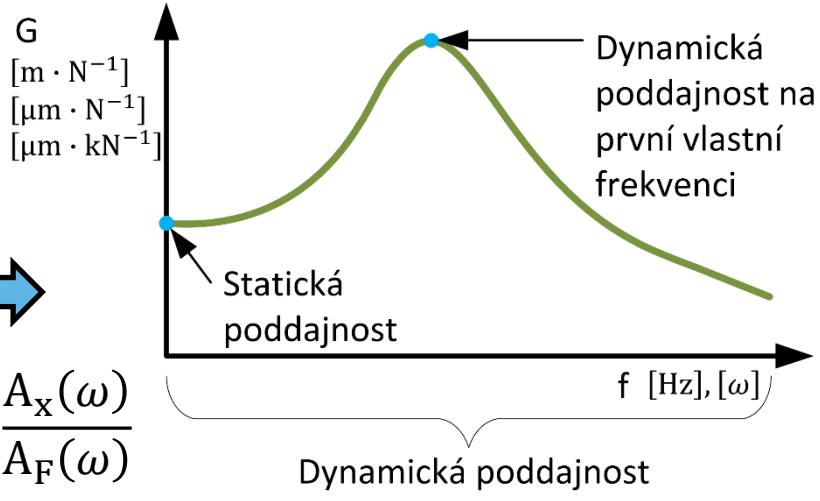


Statická tuhost, poddajnost a dynamická poddajnost

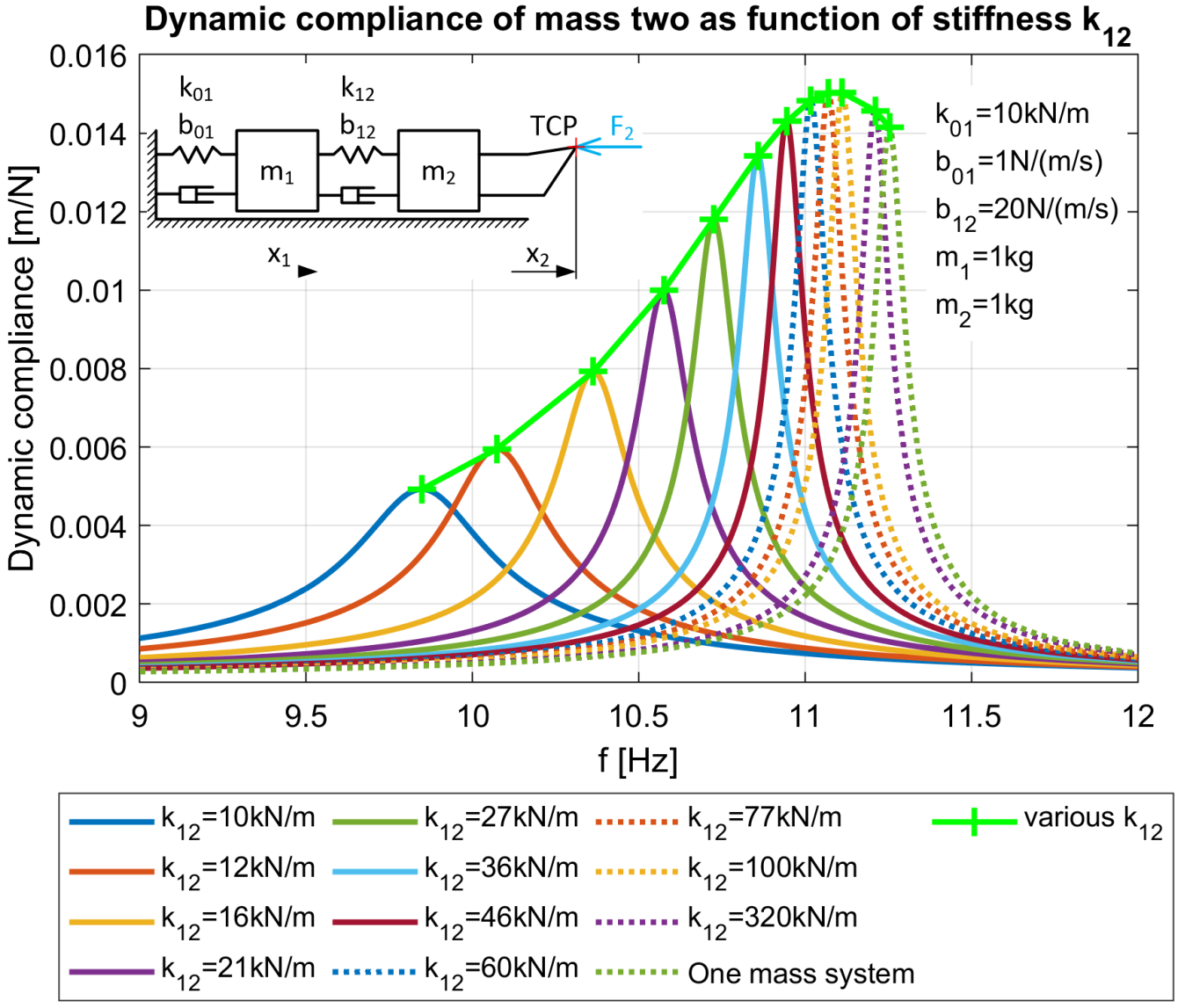
- Tuhost je definována jako změna délky vzhledem k velikosti působící síly $k = \frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}x}$
- Poddajnost je převrácená hodnota tuhosti $\delta = \frac{1}{k} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}F}$
  - Jednotka tuhosti k je $[N \cdot m^{-1}]$, $[N \cdot \mu m^{-1}]$
  - Jednotka poddajnosti δ je $[m \cdot N^{-1}]$, $[\mu m \cdot kN^{-1}]$, …
- Dynamická poddajnost $G(\omega)$ je poměr amplitudy výchylky (deformace) systému $\mathrm{A_X}(\omega)$ k amplitudě harmonického zatížení $\mathrm{A_F}(\omega)$ působícího na systém.



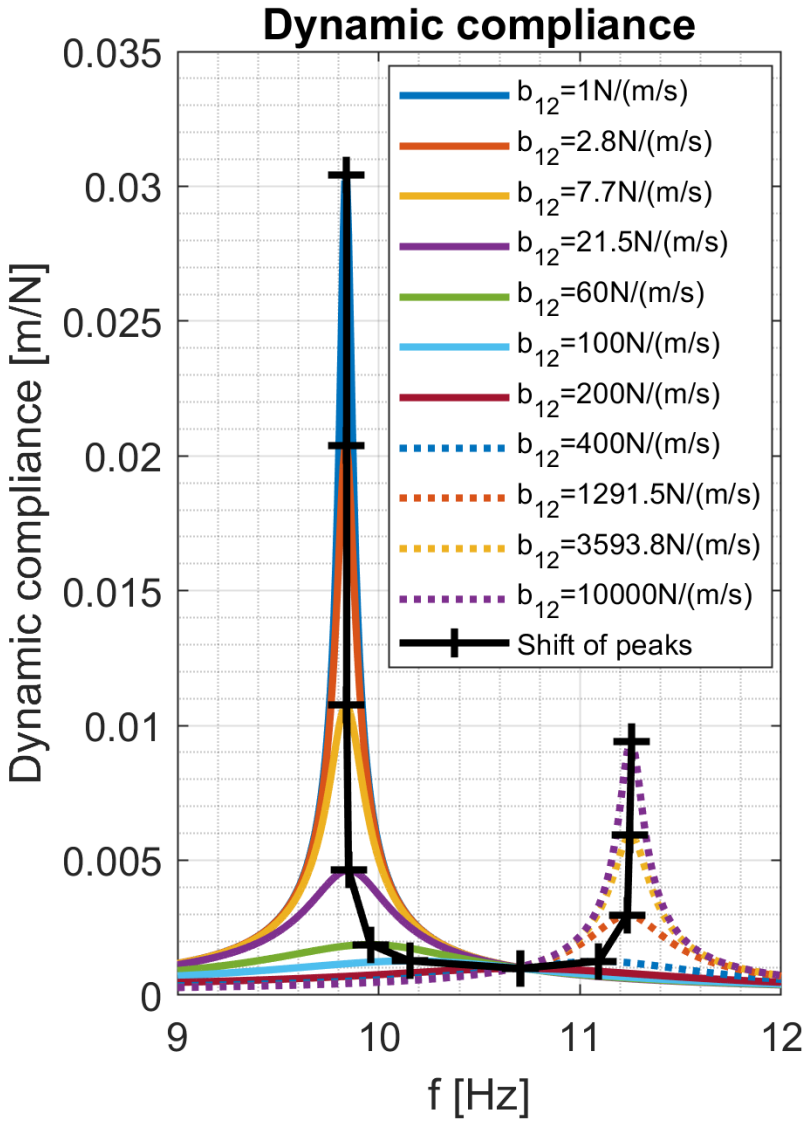
$$G(\omega) = \frac{\mathrm{A_X}(\omega)}{\mathrm{A_F}(\omega)}$$

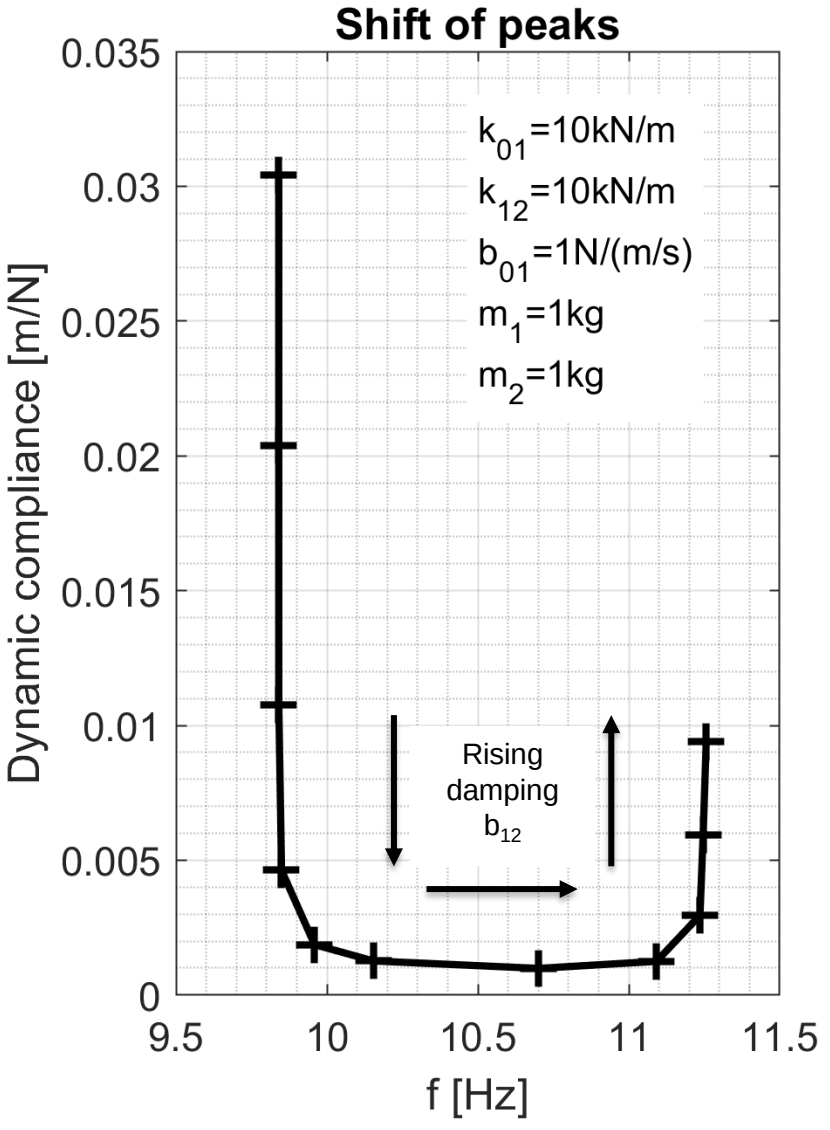


Vliv poddajnosti HS vedení na dynamickou poddajnost na nástroji



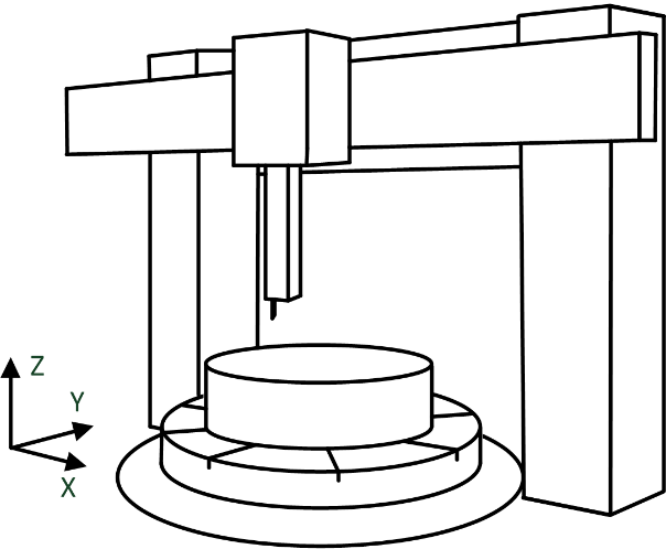
Vliv tlumení HS vedení na dynamickou poddajnost na nástroji

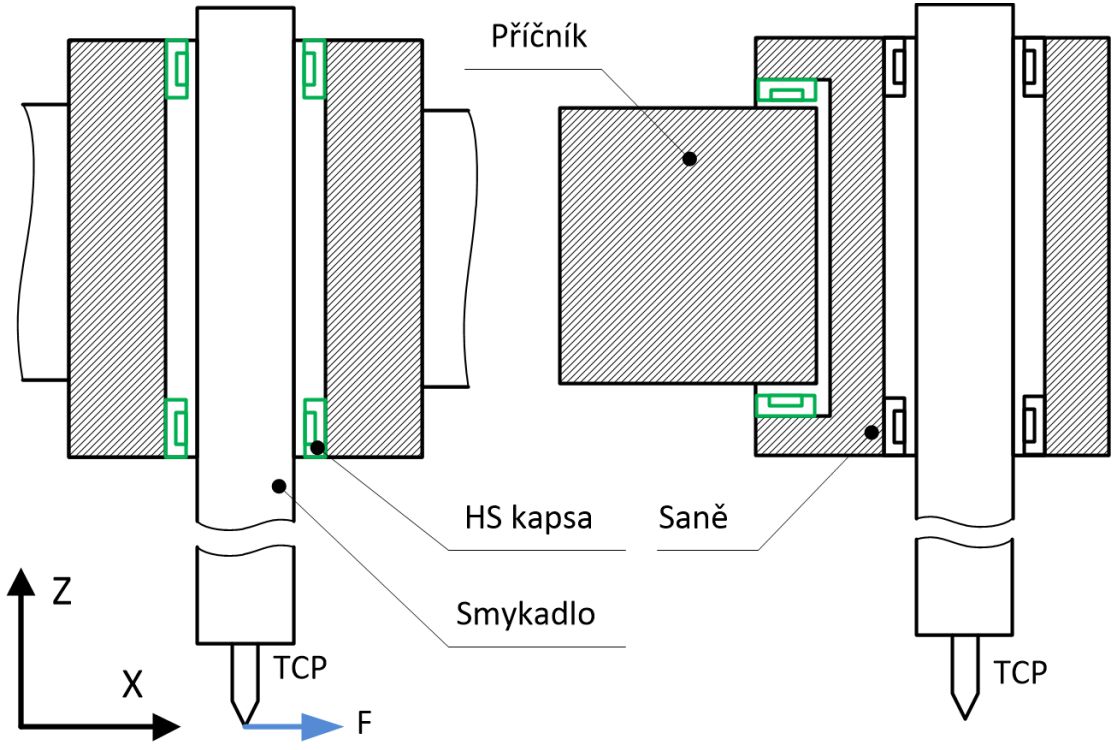




Vliv poddajnosti HS vedení na dynamickou poddajnost na nástroji

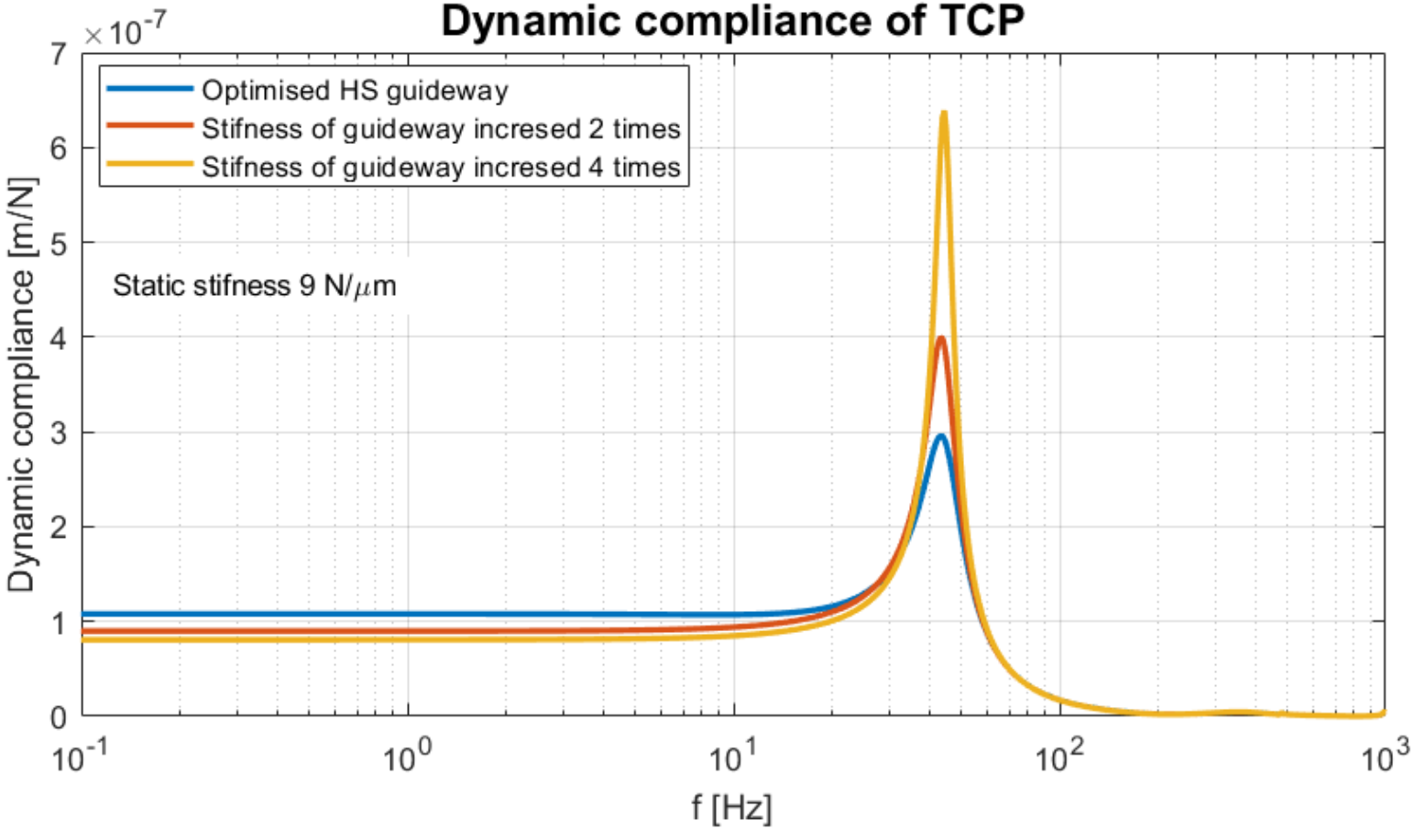
- Příklad vertikálního soustruhu s poddajným smykadlem a příčníkem
- Byla nalezena optimální tuhost a tlumení HS kapes pro snížení statické a dynamické poddajnosti





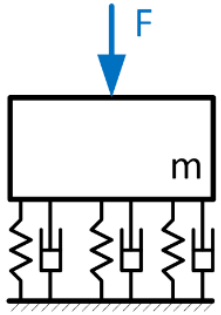
Vliv poddajnosti HS vedení na dynamickou poddajnost na nástroji

- Zvýšení tuhosti kapes HS vedení na smykadle může vést ke zvýšení dynamické poddajnosti
  - Statická poddajnost klesla o 20 %
  - Dynamická poddajnost vzrostla o 110 %

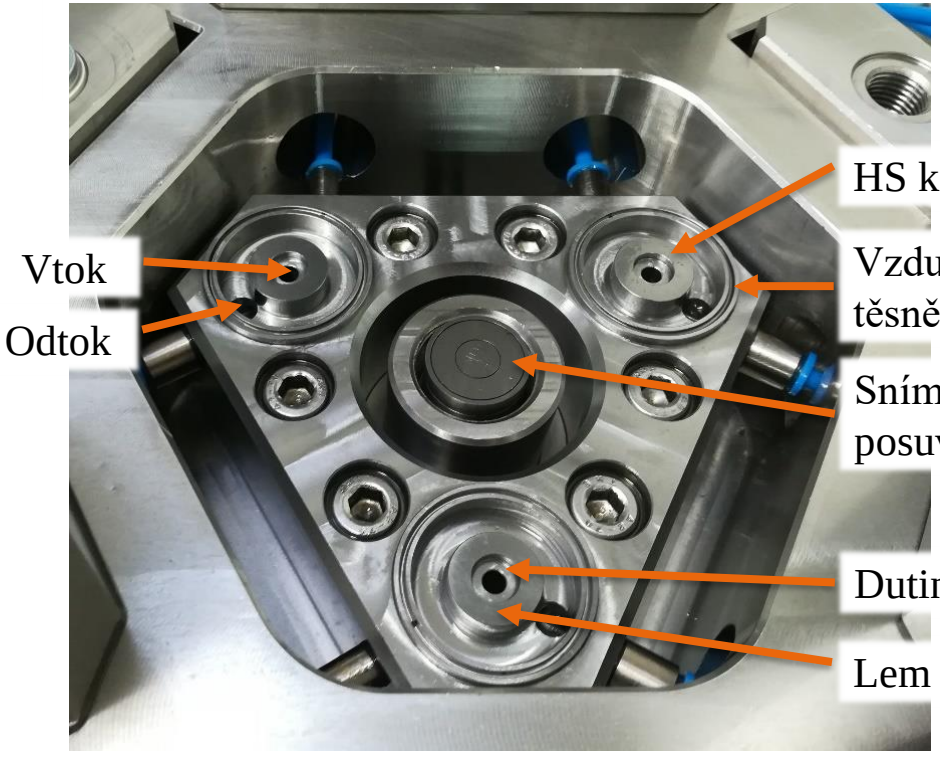


Validace měřením na testovací stolici

- Testovací stolice se třemi HS kapsami
- Buzení pioezoaktuátorem
- Výchylka měřena kapacitním snímačem
- Měření FRF

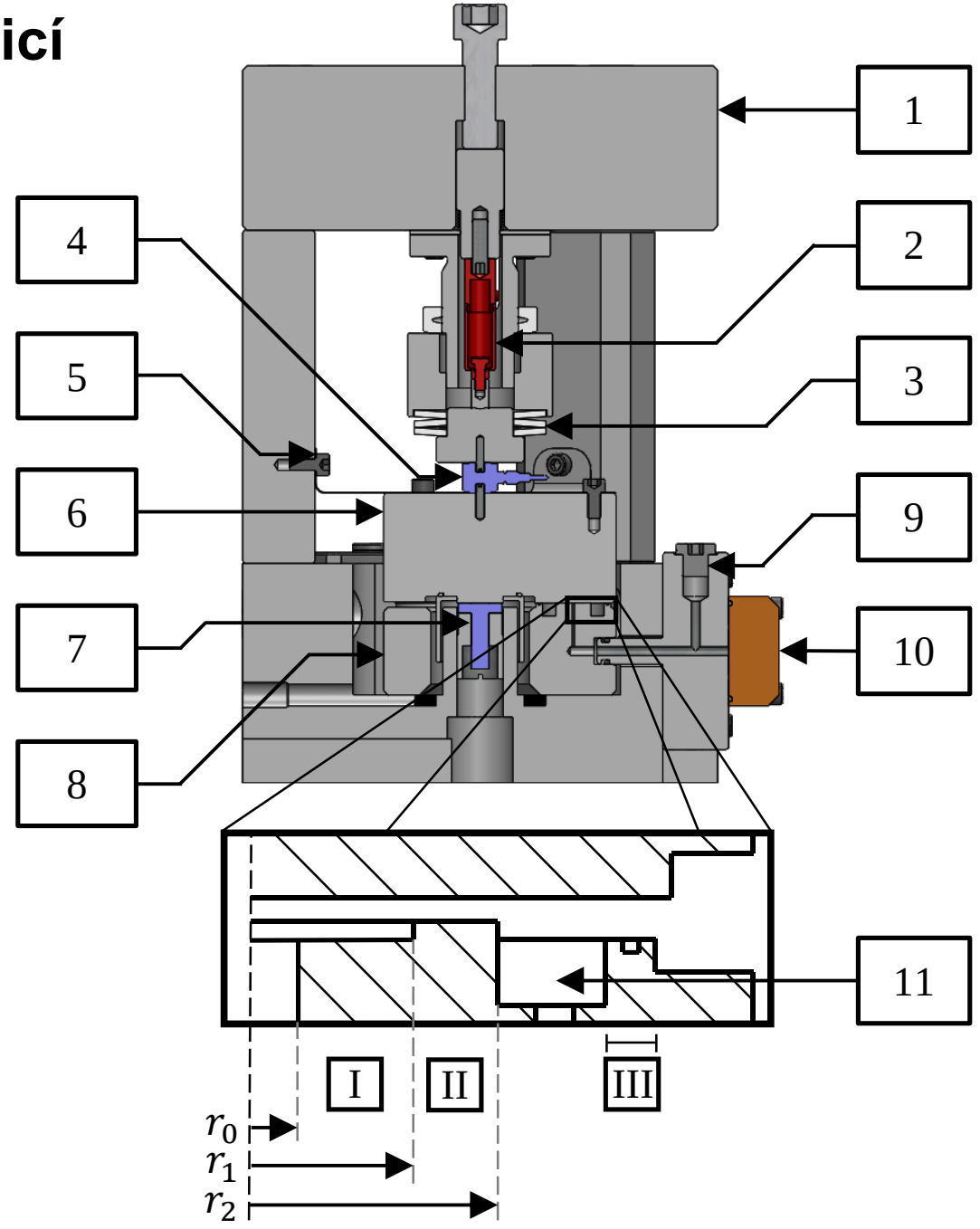


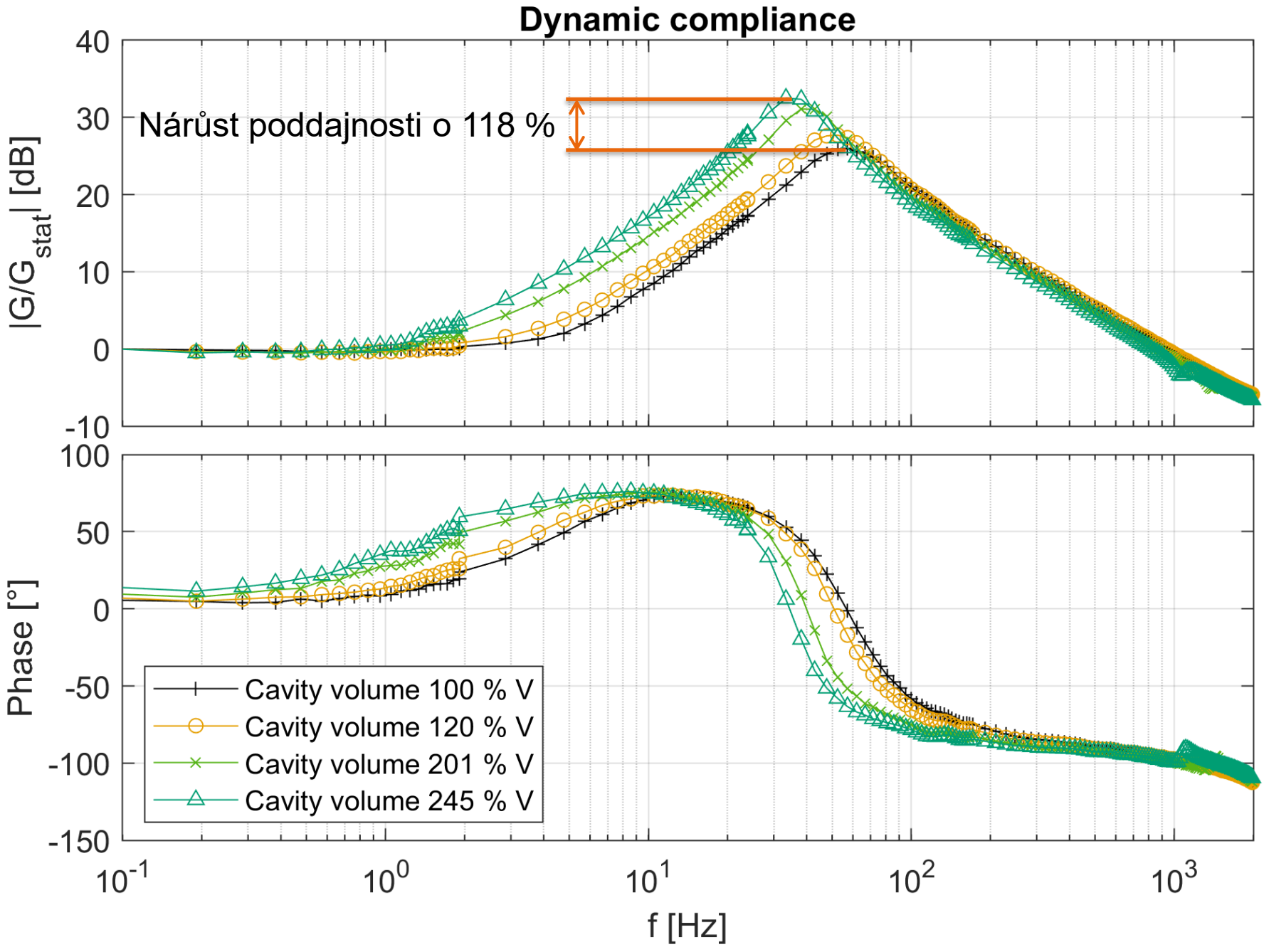
Tuhost a tlumení HS kapes

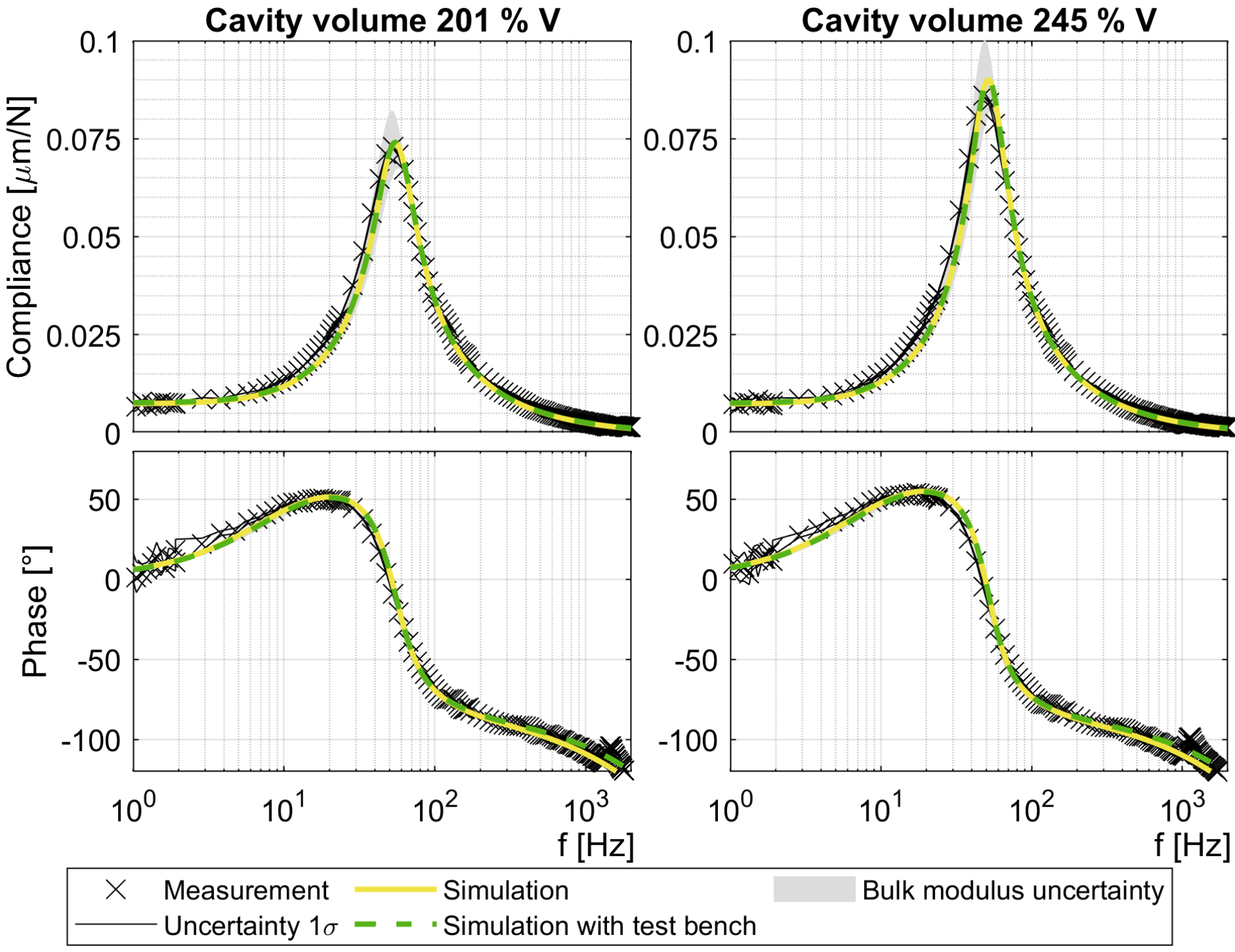


Řez testovací stolicí

1. Ocelový rám
2. Piezoelektrický aktuátor
3. Talířové pružiny
4. Snímač síly
5. Lamela
6. Pohyblivá hmota
7. Kapacitní snímač síly
8. Modul s kapsami
9. Port pro měření tlaku
10. Regulátor průtoku
11. Odtok

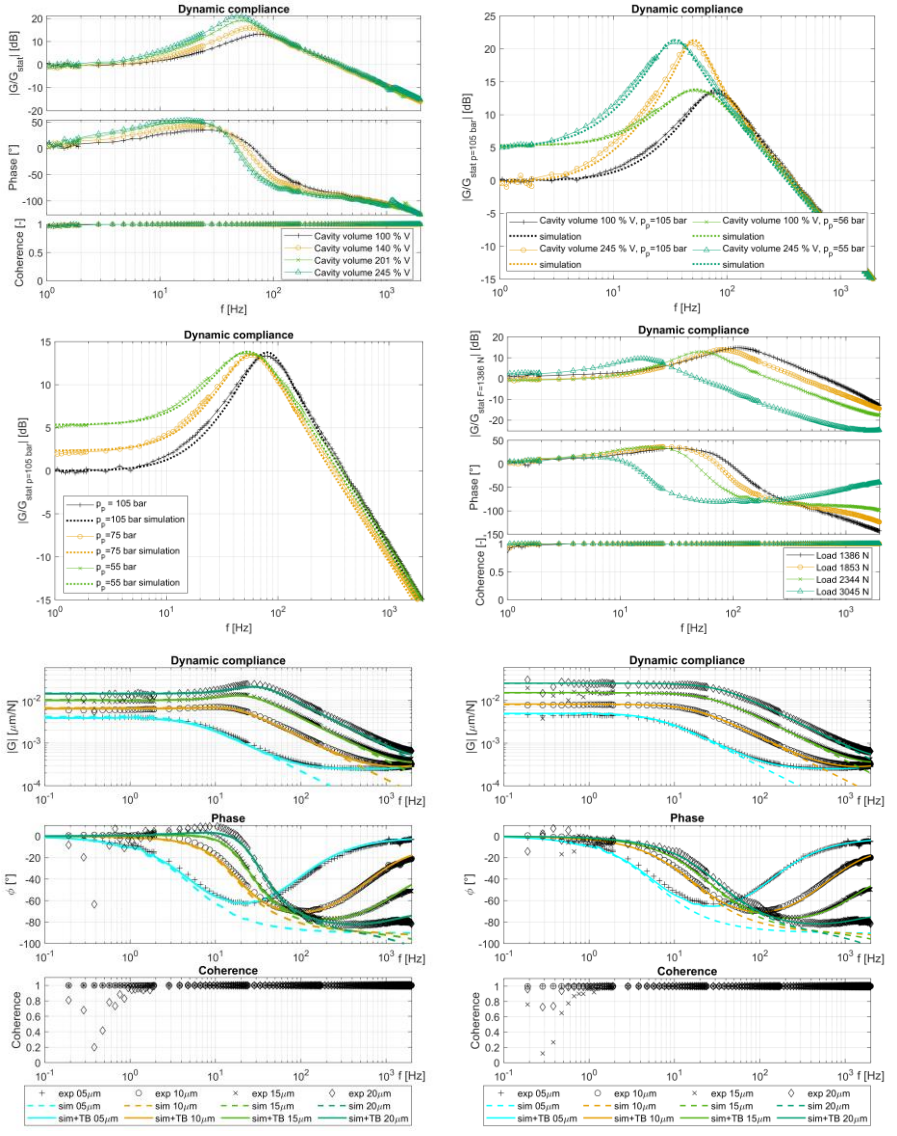



Dynamic compliance
Nárůst poddajnosti o 118 %
|G/G_stat| [dB]
Phase [°]
f [Hz]
Cavity volume 100 % V
Cavity volume 120 % V
Cavity volume 201 % V
Cavity volume 245 % V


Cavity volume 201 % V
Cavity volume 245 % V
Compliance [μm/N]
0.1
0.075
0.05
0.025
0
Phase [°]
50
0
-50
-100
10^0
10^1
10^2
10^3
f [Hz]
Measurement
Uncertainty 1σ
Simulation
Simulation with test bench
Bulk modulus uncertainty

Validace modelů měřením

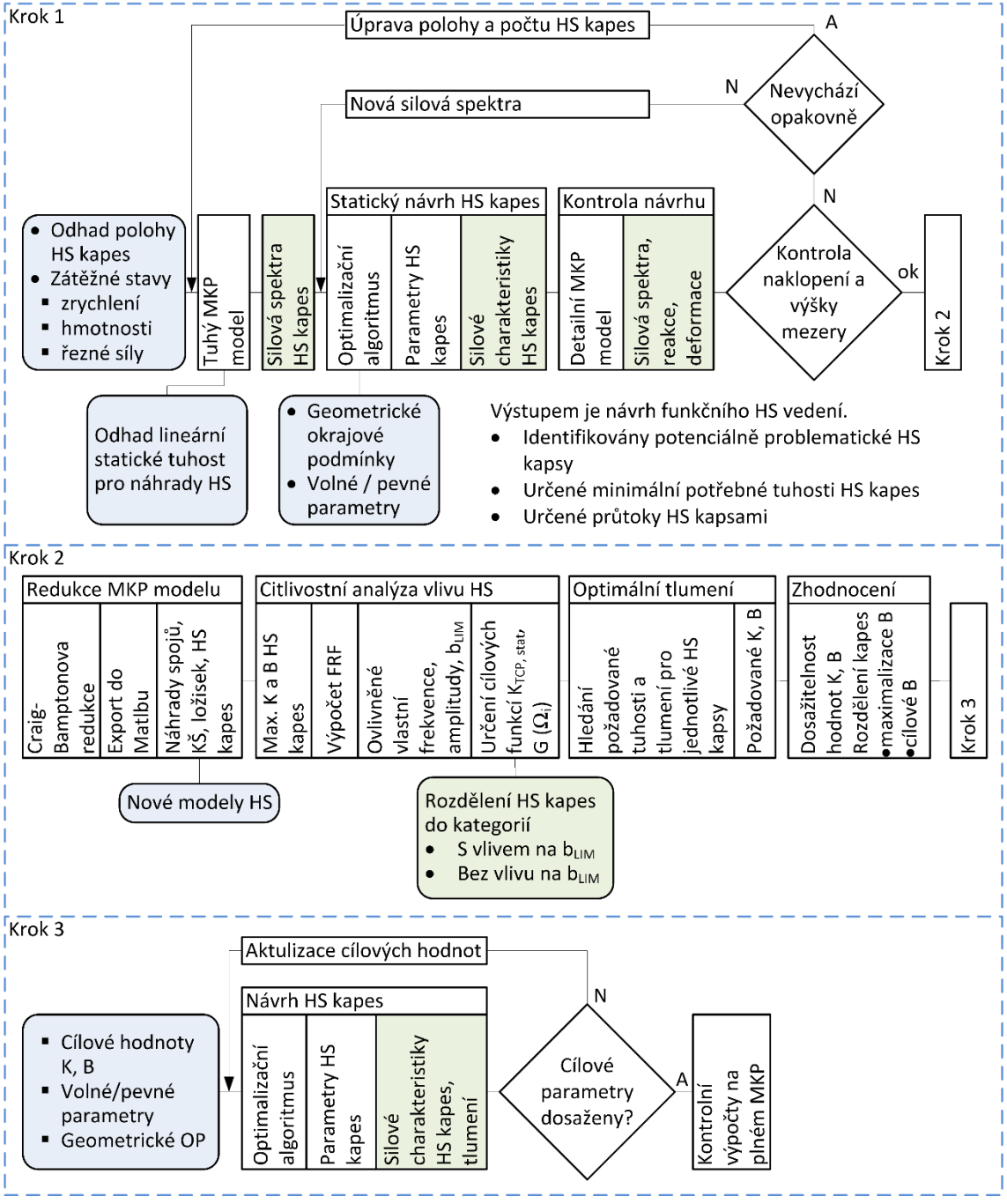
- Proběhlo velké množství měření pro validaci nových modelů
  - HS kapsa s kapilárním regulátorem
  - HS kapsa s progresivním regulátorem
  - HS kapsa s mělkou dutinou
  - HS kapsa s mělkou dutinou a kapilárou
- Široký rozsah provozních podmínek
  - Objem dutiny kapsy
  - Zatížení
  - Tlak na čerpadle
  - Teplota oleje
- **Chyba** určení vlastní frekvence a dynamické poddajnosti **průměrně 4 %**



Optimalizace

Postup optimalizace HS vedení na obráběcím stroji

1. Statický návrh HS
2. Nalezení optimální tuhosti a tlumení pro HS kapsy
3. Návrh rozměrů HS kapes



Shrnutí

- **HS kapsu** lze modelovat jako **paralelně řazenou pružinu a tlumič,** které jsou frekvenčně závislé
- **Cílem** při návrhu HS vedení **není maximalizace tuhosti a tlumení**, ale hledání **optimální tuhosti a tlumení**.

Přínosy použití optimálního návrhu HS vedení:

- **Zvýšení produktivity** obráběcího stroje
  - Snížením dynamické poddajnosti se zvýší limitní tloušťka třísky. Tím bude možné přenést vyšší výkon do řezu a zvýšit produktivitu obrábění.

- Posouzení, zda má význam použít HS vedení.
  - Ve fázi návrhu stroje posoudit, zda má význam použít HS vedení.
  - Porovnání dynamické poddajnosti stroje s valivým a HS vedením.

- Optimální využití HS vedení
  - HS vedení je nákladná skupina stroje. Pokud se rozhodnu použít HS vedení, je vhodné ho využít naplno (docílit minimální statickou a dynamickou poddajnost na nástroji a minimální nákladů)

Děkuji za pozornost