

Vývoj semiaktivního tlumiče odpružení pro kosmonautiku

Ondřej Macháček

Školitel: Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.

Ústav konstruování

Fakulta strojního inženýrství

VUT v Brně

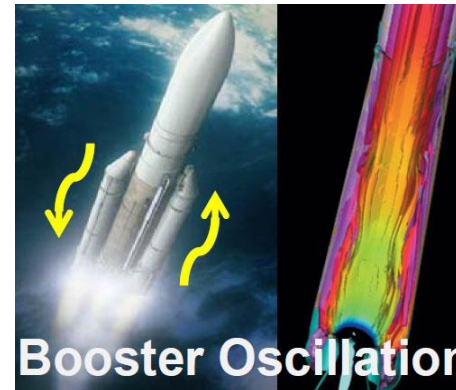
Pojednání ke státní doktorské zkoušce
5. 6. 2017

Obsah

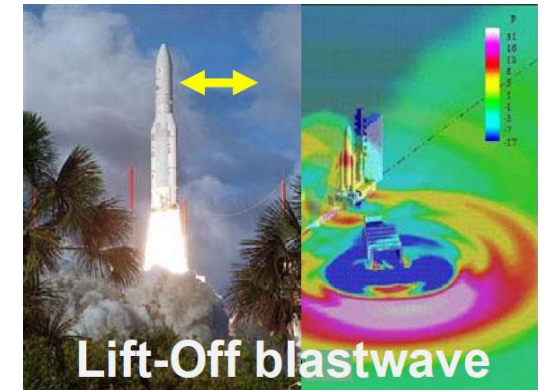
- Motivace
- Současný stav poznání
- Stav řešení práce
- Přehled dosažených výsledků
- Závěr



Fairing Separation



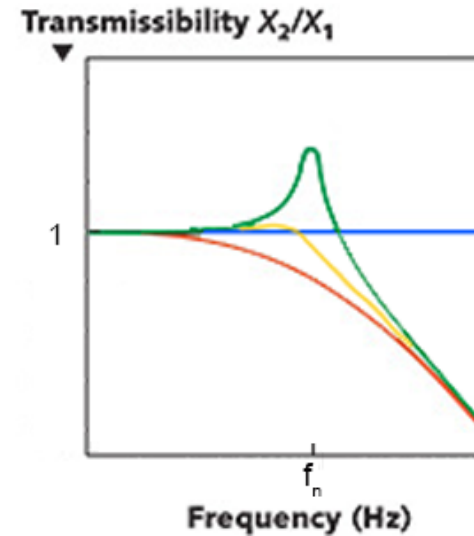
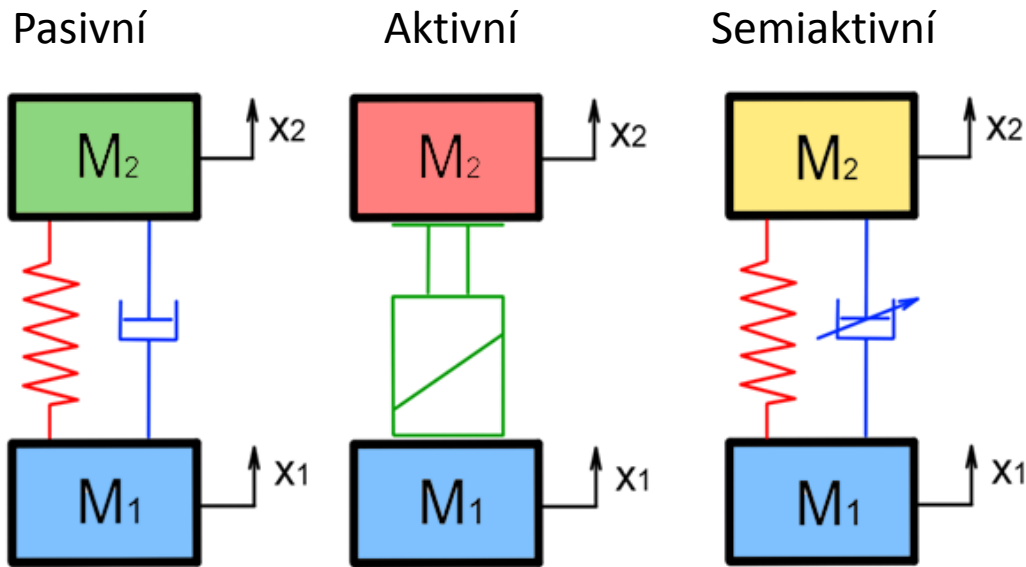
Booster Oscillation



Lift-Off blastwave

Motivace

Vibroizolační systémy (VIS)



<http://www.laserfocusworld.com>



Honeywell



<http://www.esa.int>

Současný stav poznání – vibroizolační systém

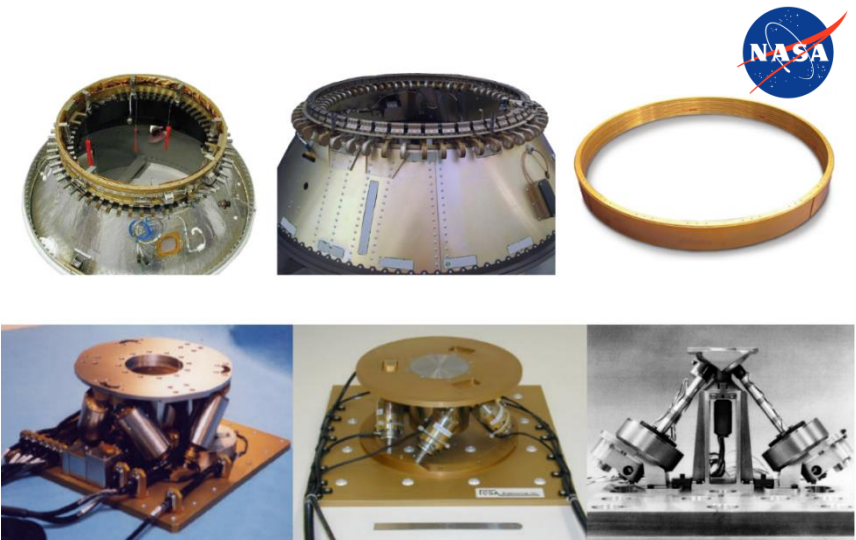
PEREZ E. (2014) Ariane 5: User's Manual.

- Nejčastěji využívaný adaptér PAS 1194C (65% všech letů)
- Hmotnost nákladu 1500 – 6500 kg
- Vlastní frekvence VIS + náklad 20-45 Hz (podélný směr)
alespoň 7,5 Hz (příčný směr)



CARANTU I. & SHOVE C. (2005) Overview of payload vibration isolation systems.

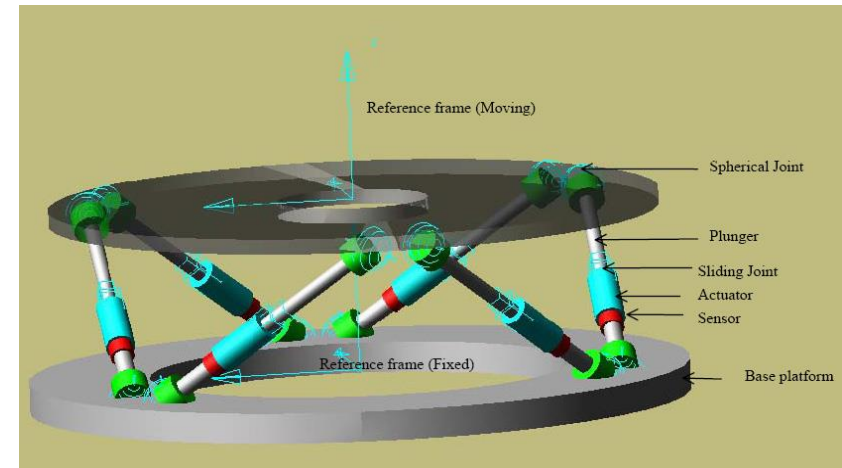
- Celkový náklad – **pasivní VIS** (softride / softflex)
- Citlivé části – doplněno **aktivním VIS**



Současný stav poznání – Stewartova plošina

ALAM a kol. (2015) Dynamic analysis and vibration control of a multi-body system using MSC Adams

- Simulace Stewartovy plošiny v MB systému
- Verifikováno pomocí analytického modelu (Matlab)

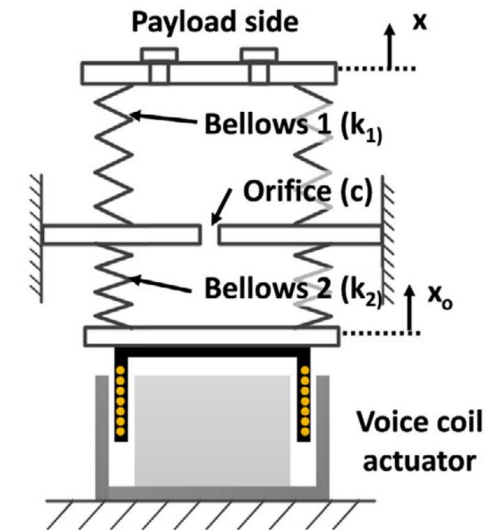


LEE a kol. (2015) Experimental study on on-orbit and launch environment vibration isolation performance of a vibration isolator using bellows and viscous fluid

- Aktivní systém doplněný o pasivní tlumič
- Experimentálně ověřen v různých podmínkách:

$p = 1.3 \text{ Pa}$ až 101 kPa
(změna tuhosti)

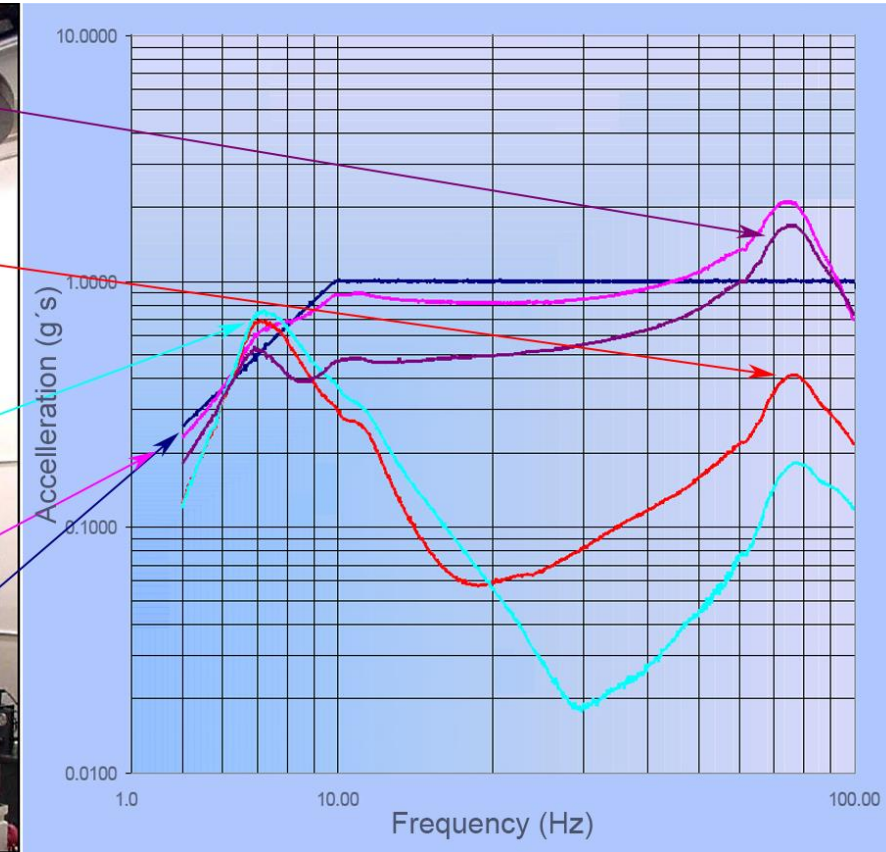
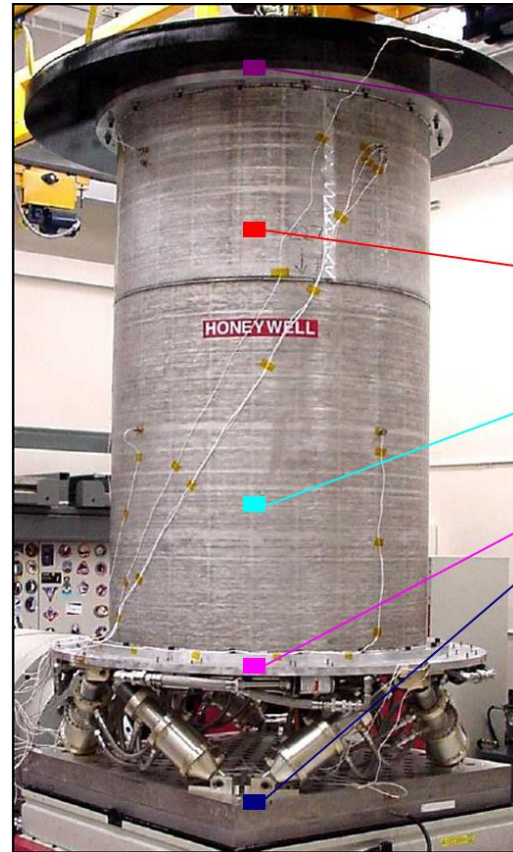
$t = -10$ až $+50^\circ\text{C}$
(změna tlumení)



Současný stav poznání – Stewartova plošina

RUEBSAMEN, D. T., (2003) Evolved launch vibration isolation system (ELVIS) demonstration unit test results

- Pasivní systém pro viroizolaci celého nákladu
- 8 pružných vzpěr se zabudovaným tlumičem
- Parametry experimentu
 - hmotnost nákladu: 1 135 kg
 - průměr nákladu: 1 115 mm
 - výška těžiště: 1 600 mm
 - buzení: příčné ($\pm 2,5$ mm / 1g)
- Během testů se vybudily 2 vlastní tvary
 - příčný posuv 7,5 Hz
 - kolébání 80 Hz



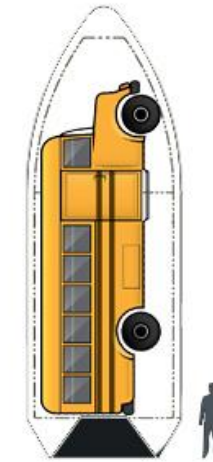
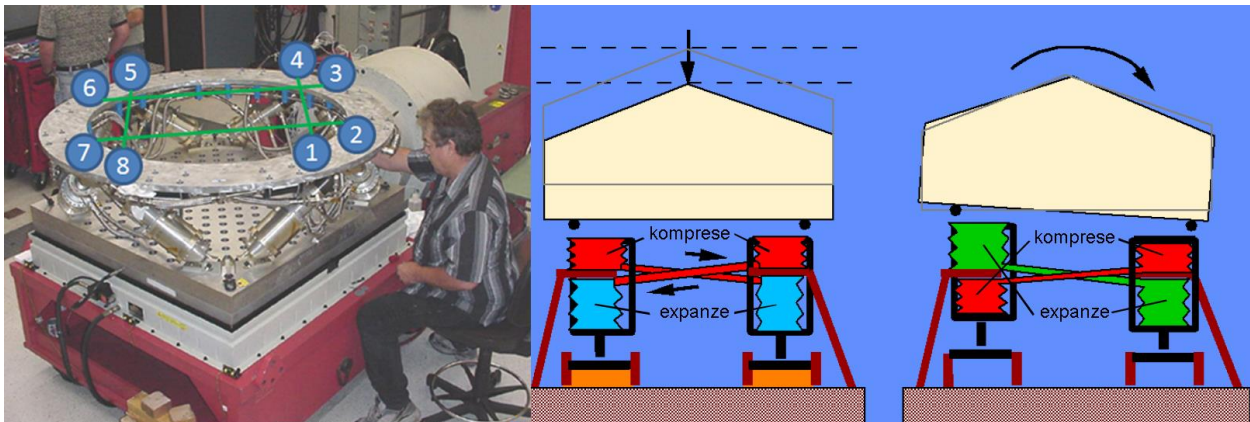
Současný stav poznání – stabilizátory

Orientace nákladu v kosmickém nosiči určuje jeho náchylnost ke kolébání

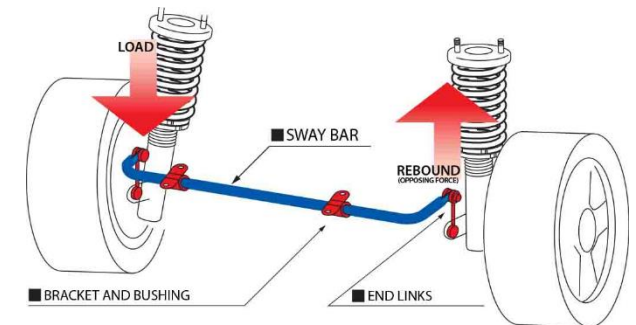
- Tuhost vzpěr Stewartovy plošiny ovlivňuje příčný i podélný posuv
- Poměr tuhostí lze regulovat
 - sklonem vzpěr
 - použitím stabilizátoru

RUEBSAMEN, D. T., (2003)

Navazuje na patent US5803213 A



<http://www.spacex.com>

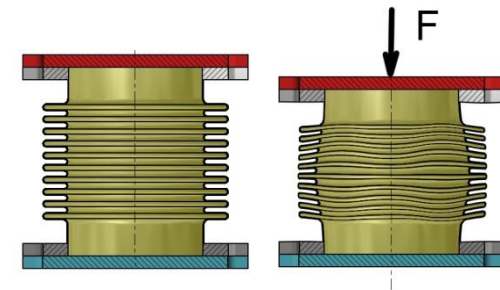
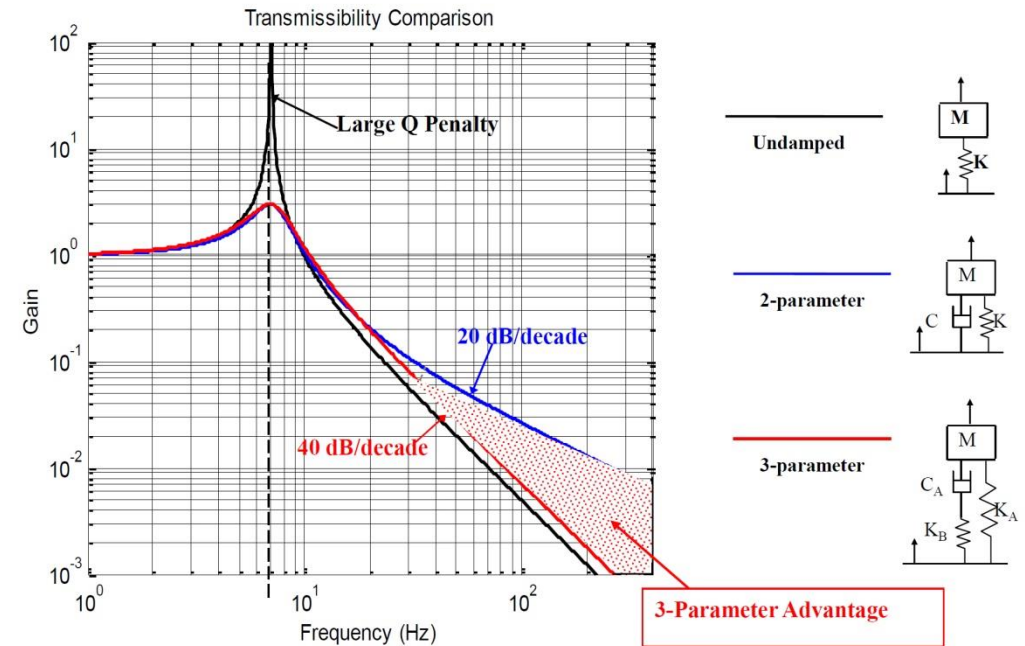
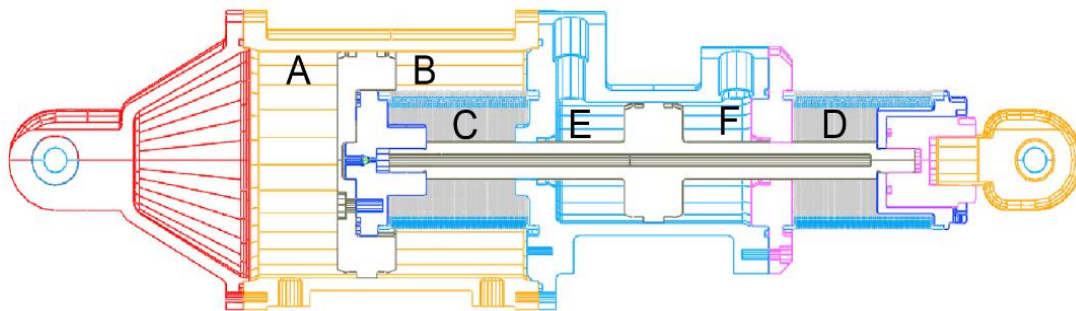


<http://www.cuscousainc.com>

Současný stav poznání – vzpěra systému ELVIS

RUEBSAMEN, D. T., (2003)

- Pružení
Pneumatická pružina (A, B)
elastické vlnovce
- Tlumení
Pružně uložený viskózní tlumič (C,D)
- Kapalinový stabilizátor (E,F)



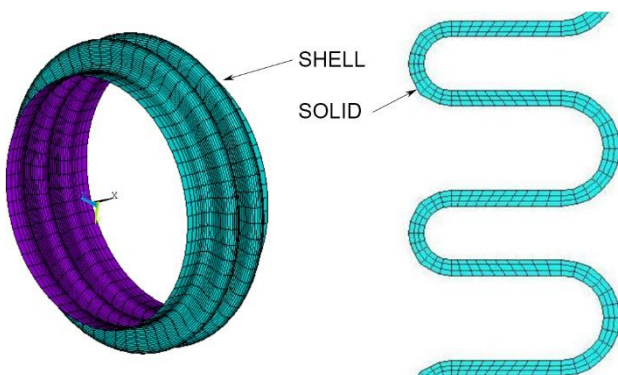
Současný stav poznání – ocelové vlnovce

Parametry vlnovců

- Axiální tuhost
- Radiální tuhost
- Maximální dovolený tlak
- **Chybí informace o objemové tuhosti „BÍLÉ MÍSTO“**



<http://www.witzenmann.com>



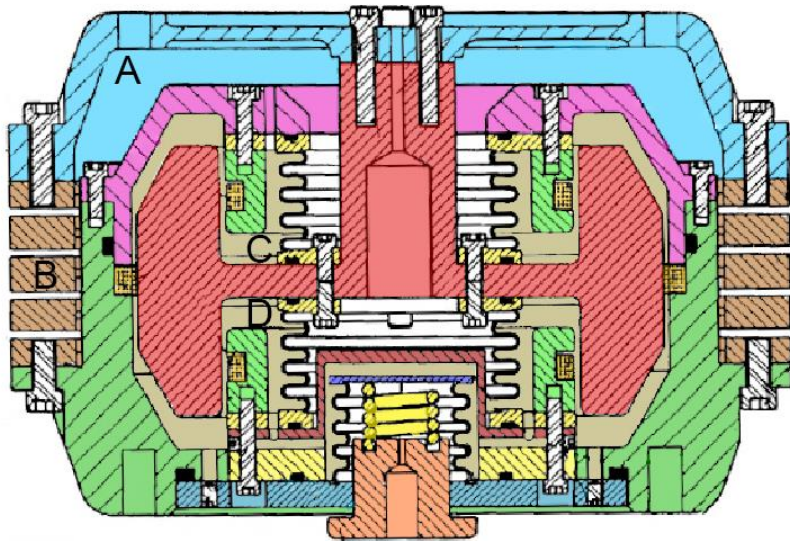
THAKKAR, H., R. (2011) Study of design aspects of expansion joints with metallic bellows and their performance evaluation

- Axiální tuhost
- Porovnání dvou MKP modelů – prvky: SHELL / SOLID
- Výsledky byly porovnány s analytickým výpočtem a experimentem (odchylka 18% SHELL, 23% SOLID)

Současný stav poznání – magnetoreologické tlumiče

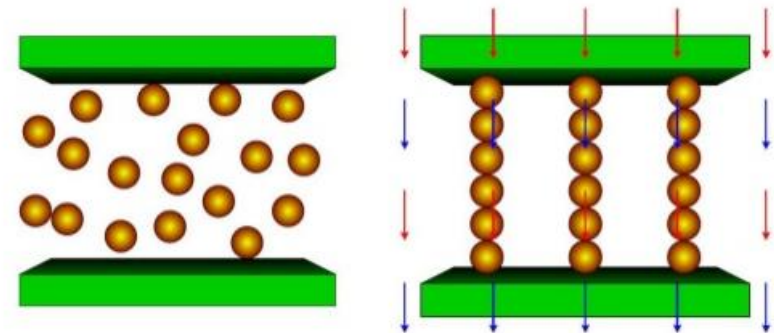
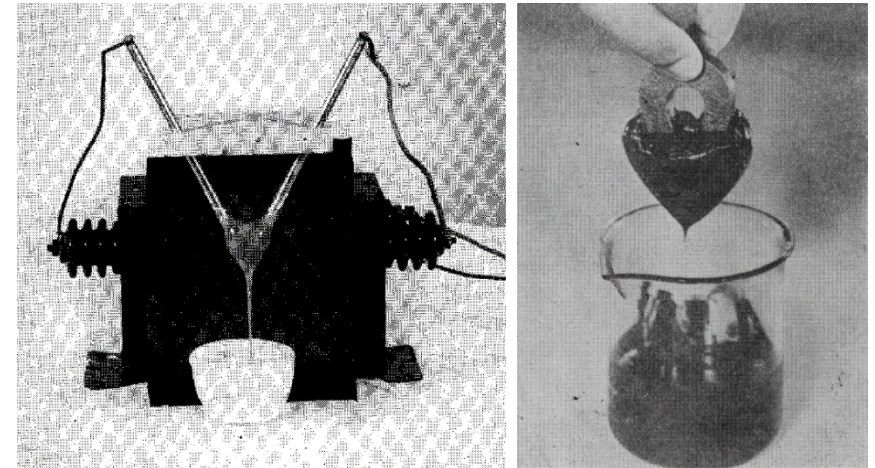
KELSO, J. & E. LINDER. (2004) Magnetorheological Fluid Vibration Isolator US20040195061 A1

- Pružení
Elastická deformace materiálu (A, B)
- Tlumení
pružně uložený Magnetoreologický tlumič (C,D)



WINSLOW, W., M. (1949) Induced Fibrillation of suspension

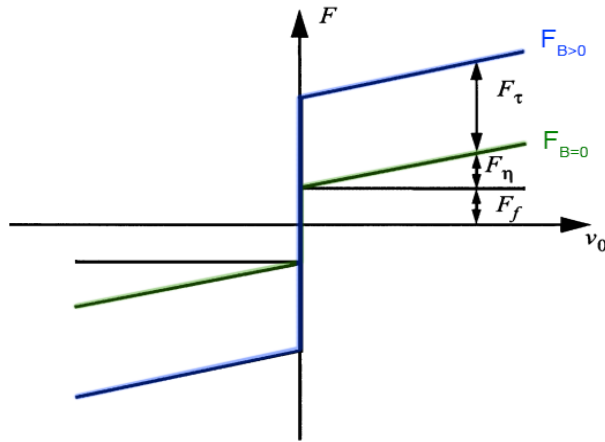
RABINOW, J. (1948) The Magnetic Fluid Clutch



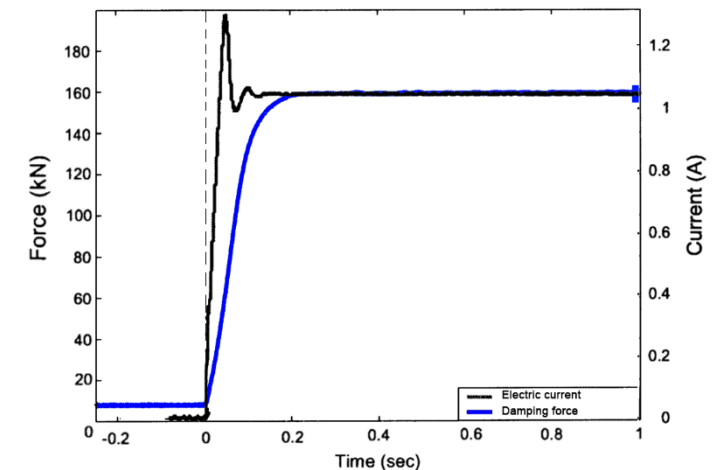
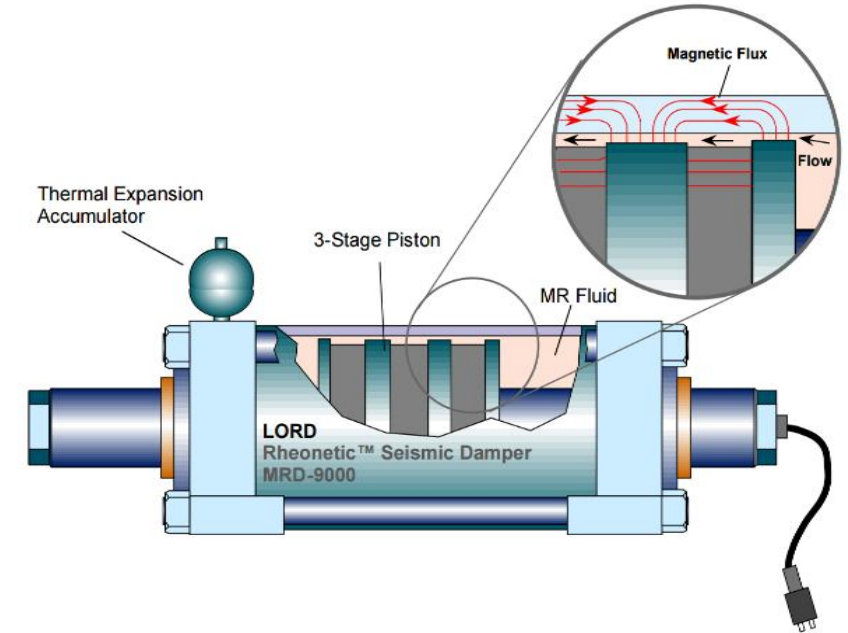
Současný stav poznání – Magnetoreologické tlumiče

YANG a kol. (2001) Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations

- Vývoj a testování tlumiče pro stavebnictví
- Dynamický rozsah cca 10
- Časová odezva 80 ms



$$D(v, B) = \frac{F_{B=max}}{F_{B=0}} = \frac{F_{\tau}(B) + F_{\eta}(v) + F_f}{F_{\eta}(v) + F_f} = 1 + \frac{F_{\tau}(B)}{F_{\eta}(v) + F_f}$$




Zhodnocení řešerše

Způsob eliminace vibrací

- Pasivní  nízká efektivita
- Aktivní  vysoké energetické nároky
- Semiaktivní 



Eliminace vibrací ve všech směrech

- Stewartova plošina 



Vyztužení příčného směru

- Kapalinový stabilizátor  vyšší tlumení, „mass effect“
- Mechanický stabilizátor 

Snížení přenosu na vysokých frekvencích

- Pružně uložený tlumič 
- Pevně uložený tlumič 

100% těsnost systému

- Pístnicová těsnění  vysoké tření
- Ocelové vlnovce 

Koncepční návrh VIS

Semiaktivní VIS

- výrazně nižší přenos než pasivní
- nižší energetické nároky než aktivní VIS
- využito bude MR tlumičů - nízká časová odezva
 - Jednoduchá konstrukce

Stewartova plošina

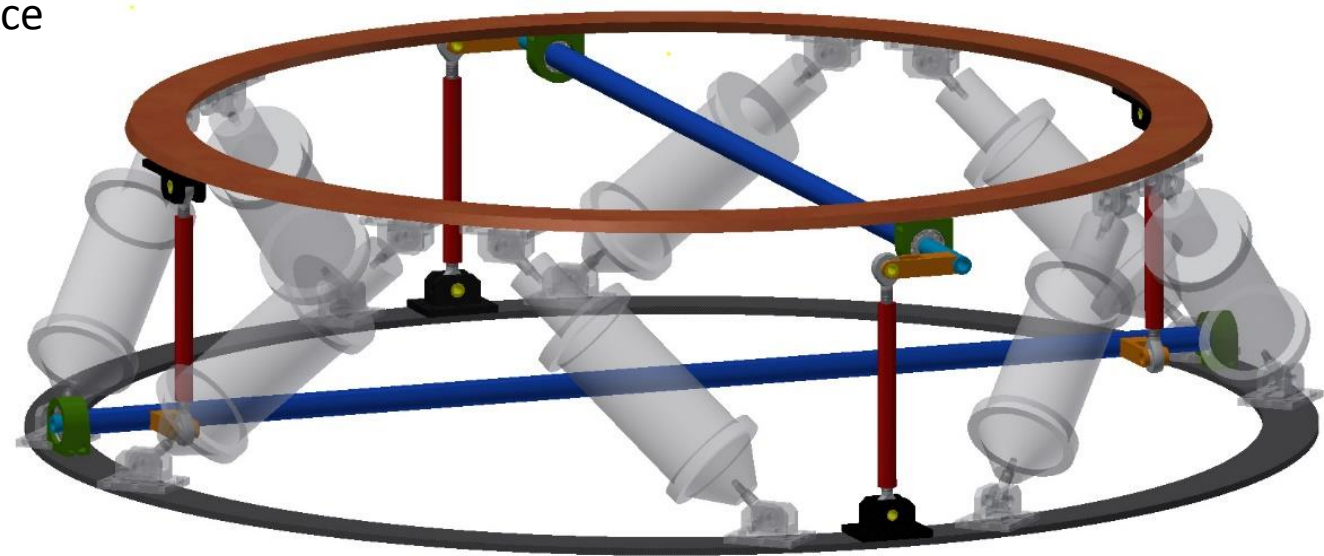
- mechanismus s 6 DOF
- nutno doplnit stabilizátorem

Stabilizátor

- mechanický neovlivní tlumení v ax. směru

Vlnovce

- možné utěsnit tlumič bez průsaku
- sníží přenos na vysokých frekvencích



Vymezení cílů disertační práce

Návrh pružící a tlumící vzpěry s externím MR ventilem pro vibroizolačního systému kosmického nosiče

Dílčí cíle:

- Vytvořit dynamický model vibroizolačního systému
- Verifikovat modely a na základě simulací optimalizovat konstrukční parametry vzpěry
- Zhotovit experimentální variantu vzpěry pro laboratorní testy
- Ověření funkcionality vzpěry experimentem
- Finalizovat návrh vzpěry s ohledem na použité materiály a technologie

Název disertační práce:

„Vývoj semiaktivního tlumiče odpružení pro kosmonautiku“



„Magnetoreologická vzpěra do vibroizolačního systému kosmického nosiče“



Určení parametrů MR vzpěry

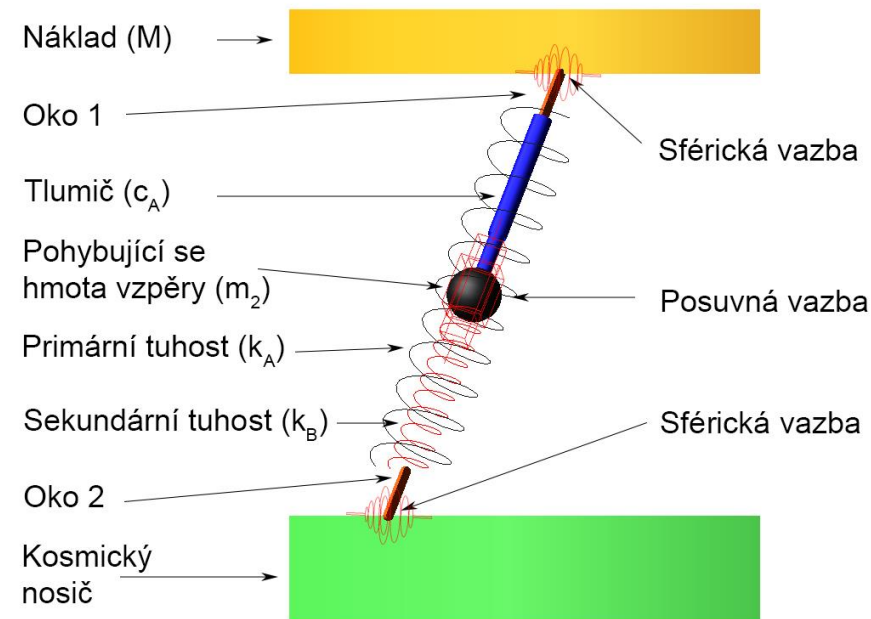
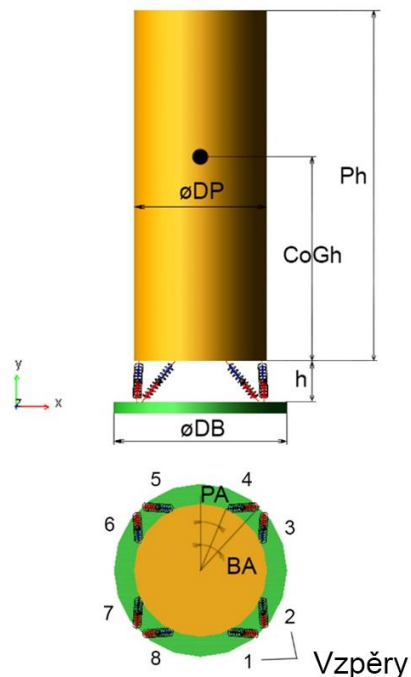
Parametrický model v MultiBody systému

Software: ADAMS view

Verifikace: model v software Matlab (Doc. Krejsa)

Porovnáním přenosových funkcí umožňuje nalézt:

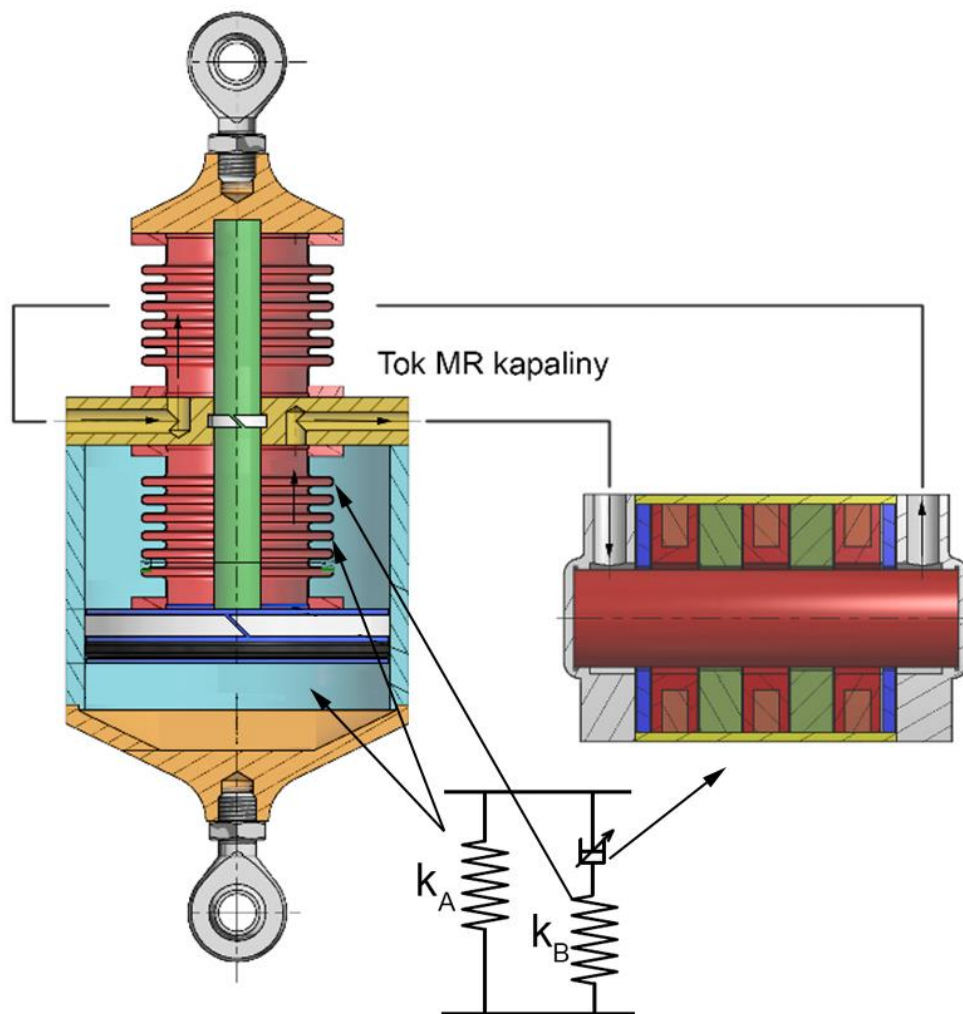
- Vhodnou geometrii VIS
- Vhodné tlumení MR vzpěry
- Vhodná primární a sekundární tuhost vzpěry



Koncepční návrh MR vzpěry

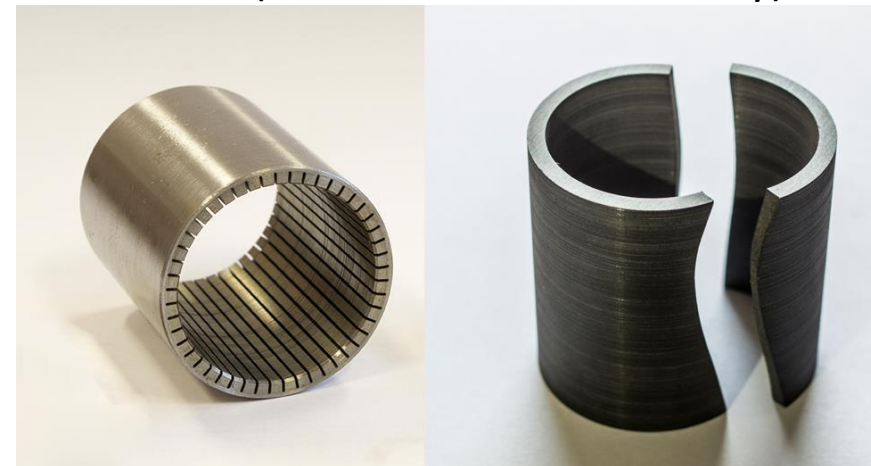
Pružicí větev
(pneumatická pružina + objemová jednotka)

Tlumicí větev
(MR ventil)

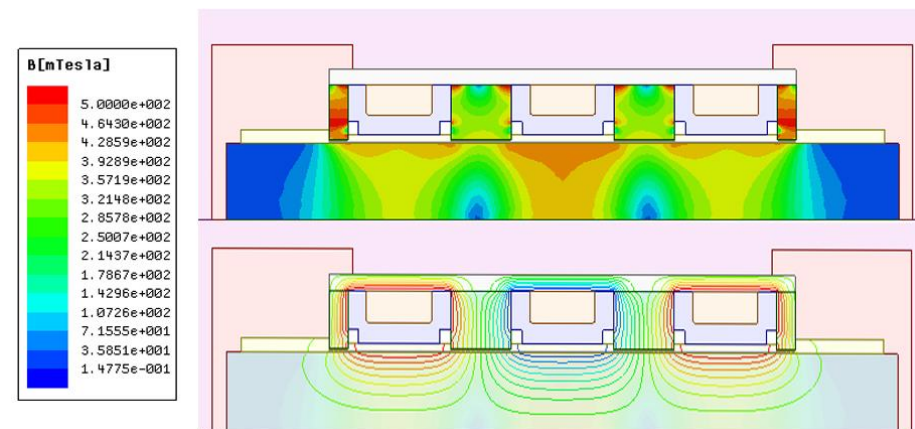


Pojednání ke státní závěrečné zkoušce

- Časová odezva (volba materiálu, struktury)



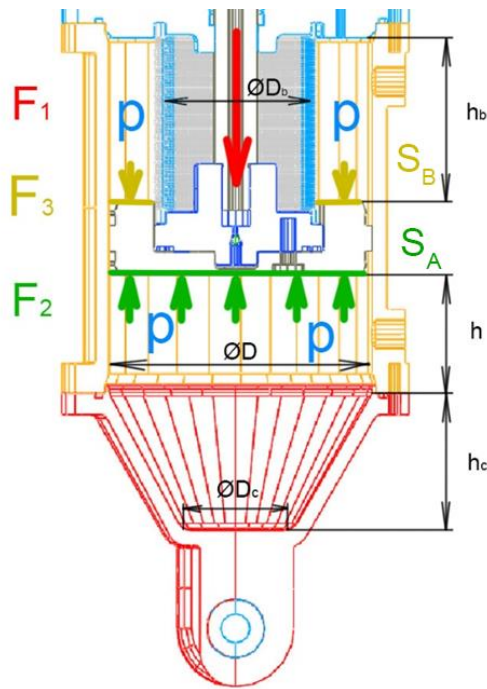
- Dynamický rozsah (magnetický a reologický model)



Primární tuhost - k_A

Pneumatická pružina

- Rovnotlaká
- Návrh založen analytickém výpočtu



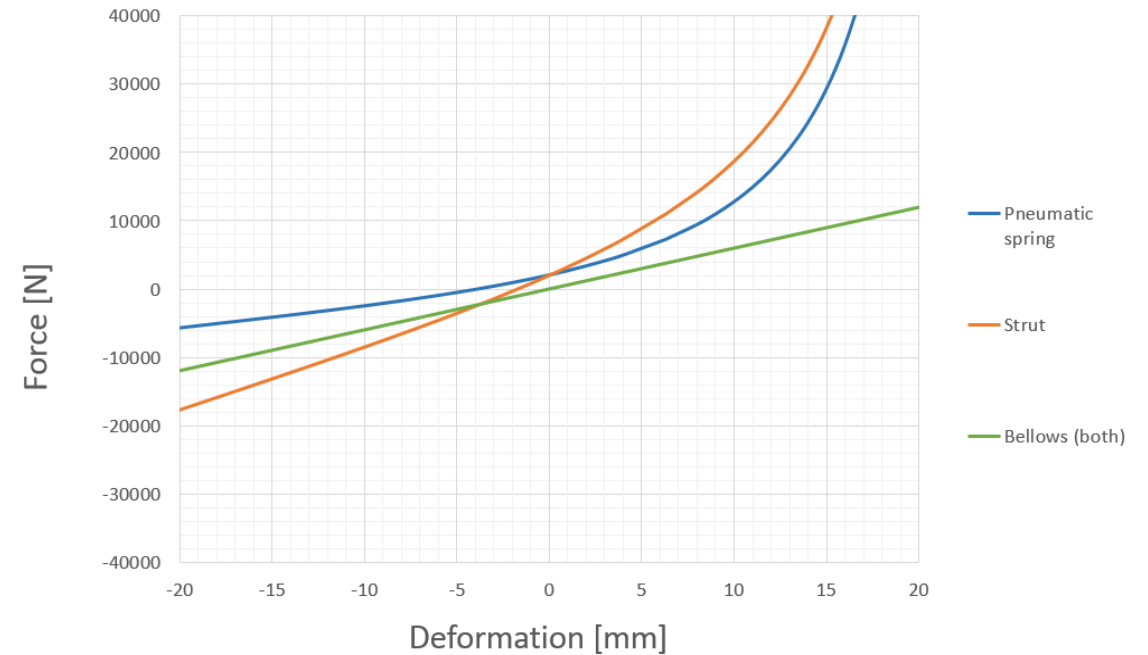
$$F_1 = m \cdot g$$

$$F_2 = p \cdot S_A$$

$$F_3 = p \cdot S_B$$

$$F_1 = F_2 - F_3$$

Závislost síly na stlačení MR vzpěry



Axiální tuhost vlnovců – katalog výrobce

Sekundární tuhost - k_B

MKP model

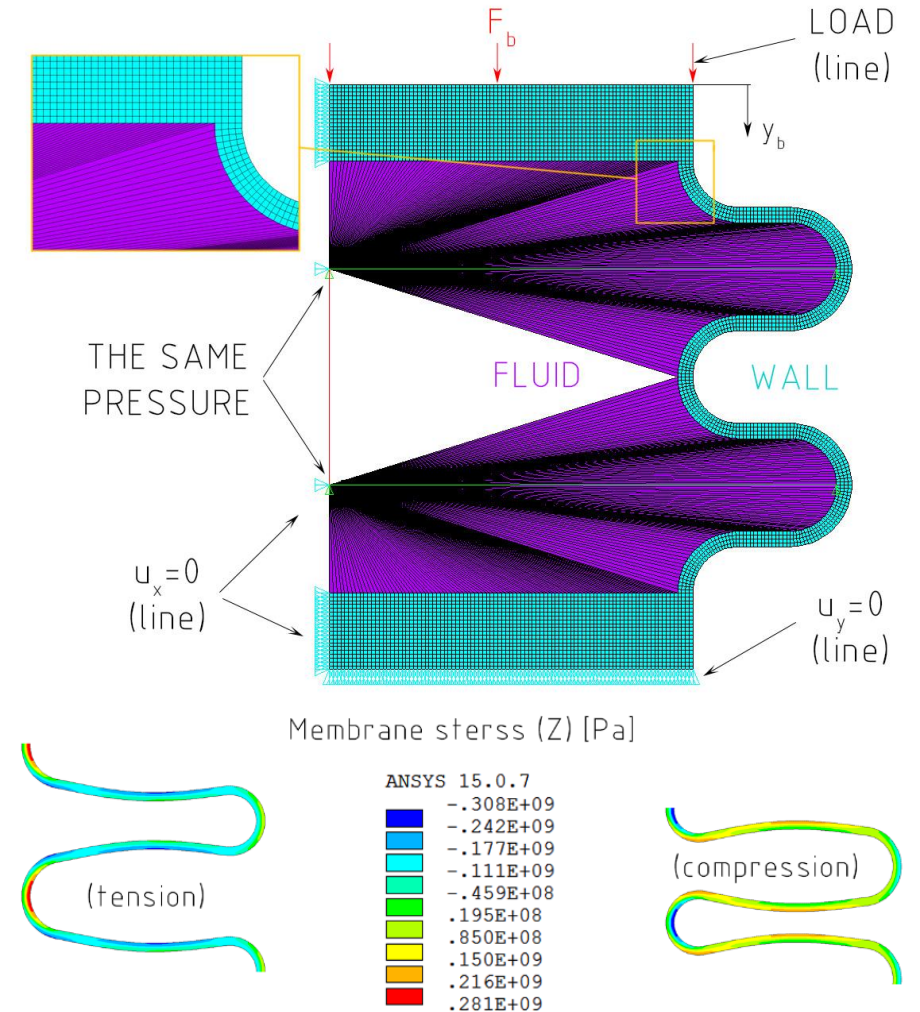
Spolupráce s ústavem mechaniky těles – Ing. Michal Peč

Parametry modelu

| | |
|---------------------|------------|
| Symetrie: | Osa Y |
| Typ prvků (obal) | SOLID 182 |
| Typ prvků – (náplň) | HSFLD 231 |
| Řešení | nelineární |

Verifikace – nepřesná tloušťka stěny

- Katalog – tloušťka polotovaru – 0.25 mm
- Skutečnost – nižší hodnota (tváření) – 0.22 mm
- Řešení – výpočtová tloušťka byla určena z experimentálně ověřených dat (výrobce)

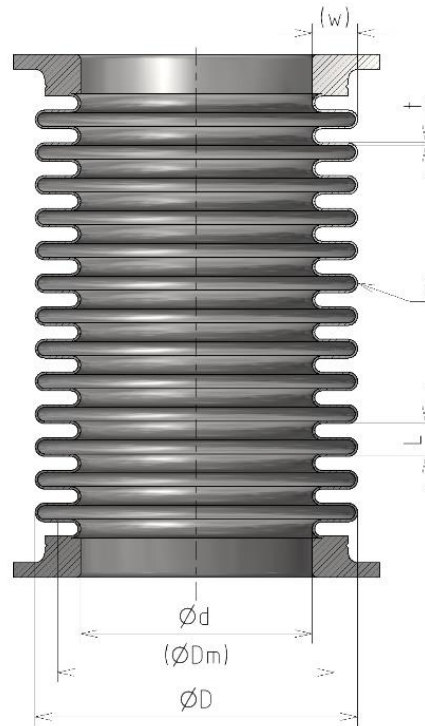
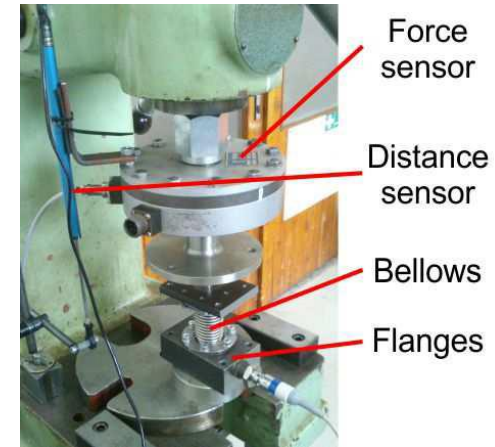


Sekundární tuhost - k_B

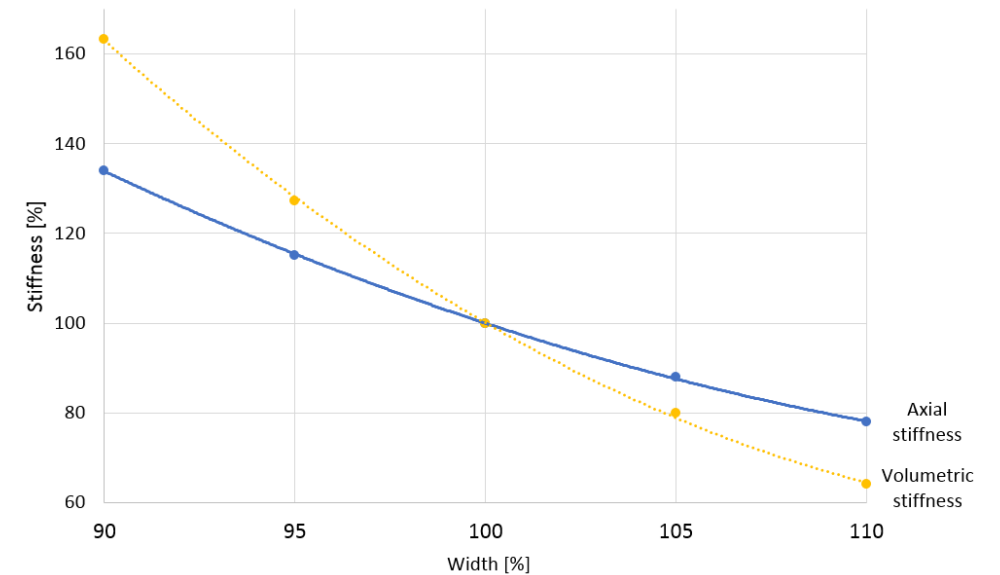
Verifikace modelu

Odchylka modelu od experimentálně určených výsledků

| | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| Axiální tuhost: | 21.8% |
| Objemová tuhost: | 26.3% |
| Přesnost garantovaná výrobcem | $\pm 30\%$ (axiální tuhost) |

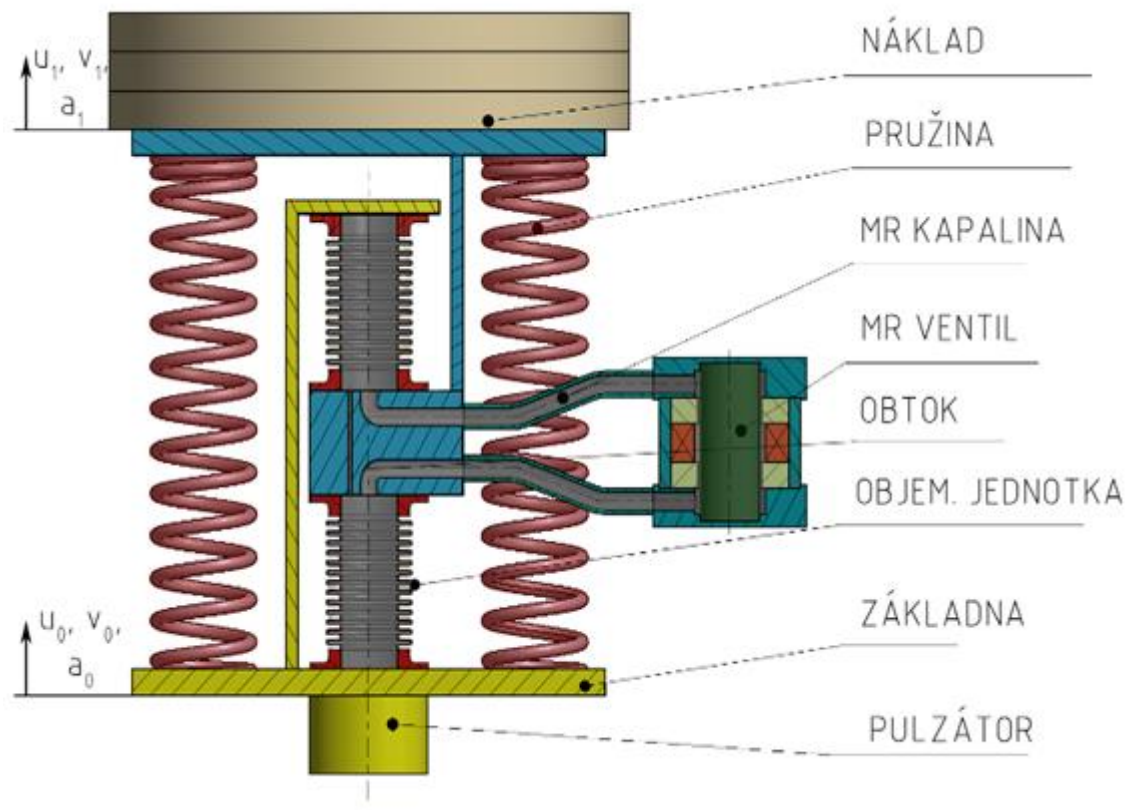


Citlivostní analýza

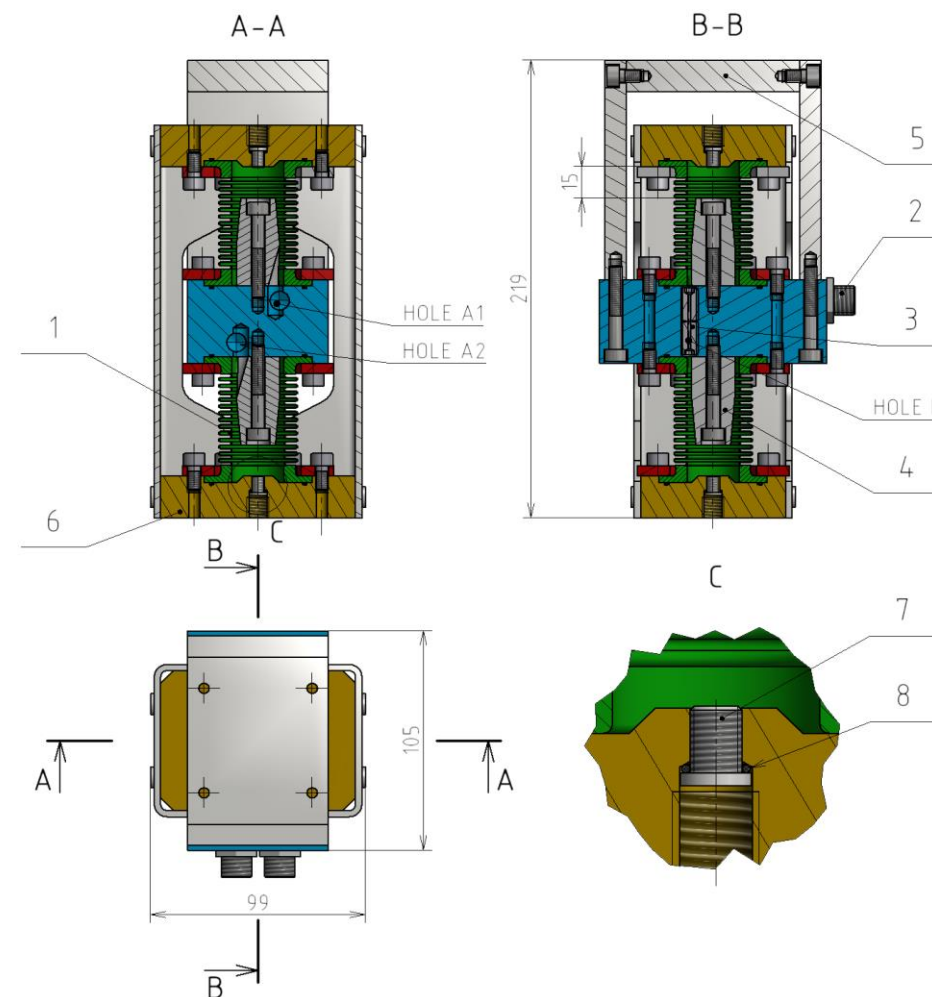


Experimentální vzpěra

Schéma experimentální vzpěry



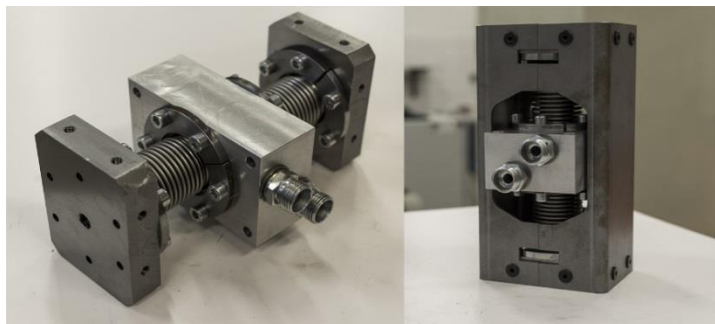
Objemová jednotka s vlnovci



Experimentální vzpěra

Objemová jednotka

financováno: FEKT/FSI-J-16-3694

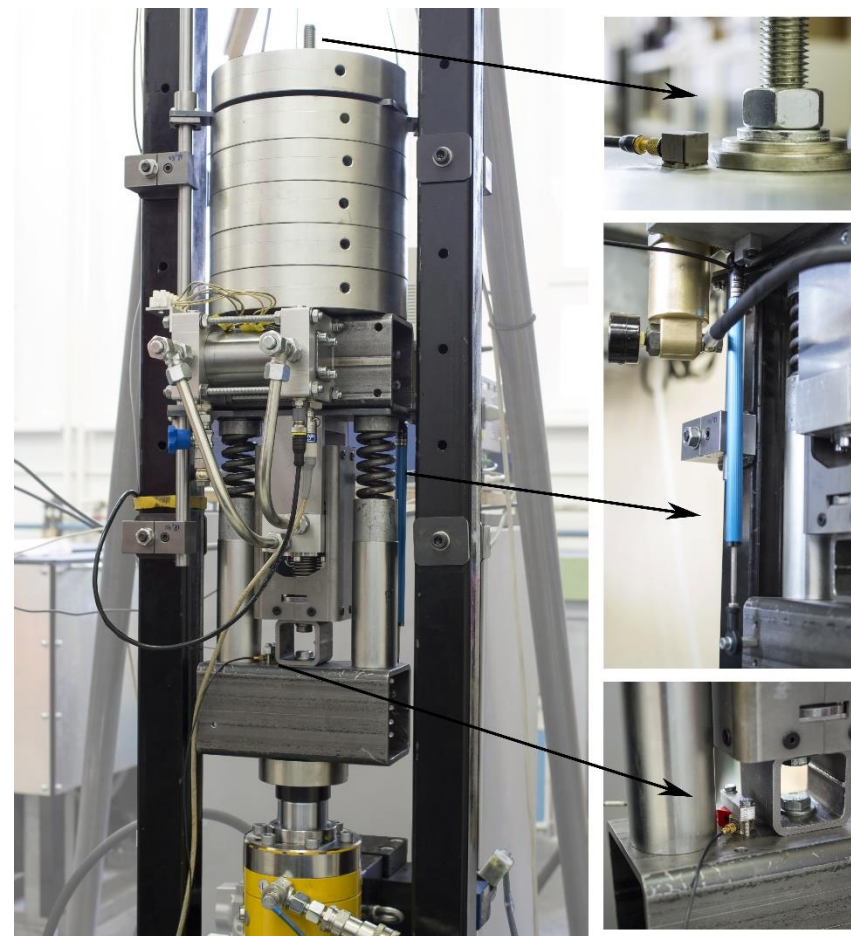


MR ventil

financováno: FEKT/FSI-J-15-2777 (M. Kubík)



Osazení snímači



Payload
acceleration

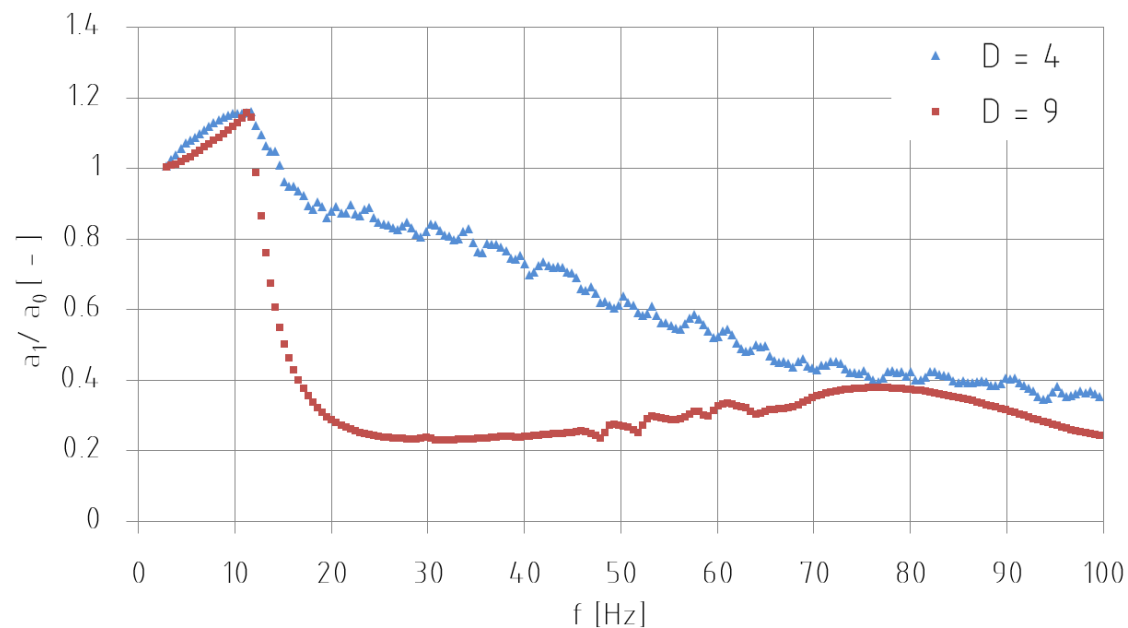
Payload / Base
displacement

Base
acceleration

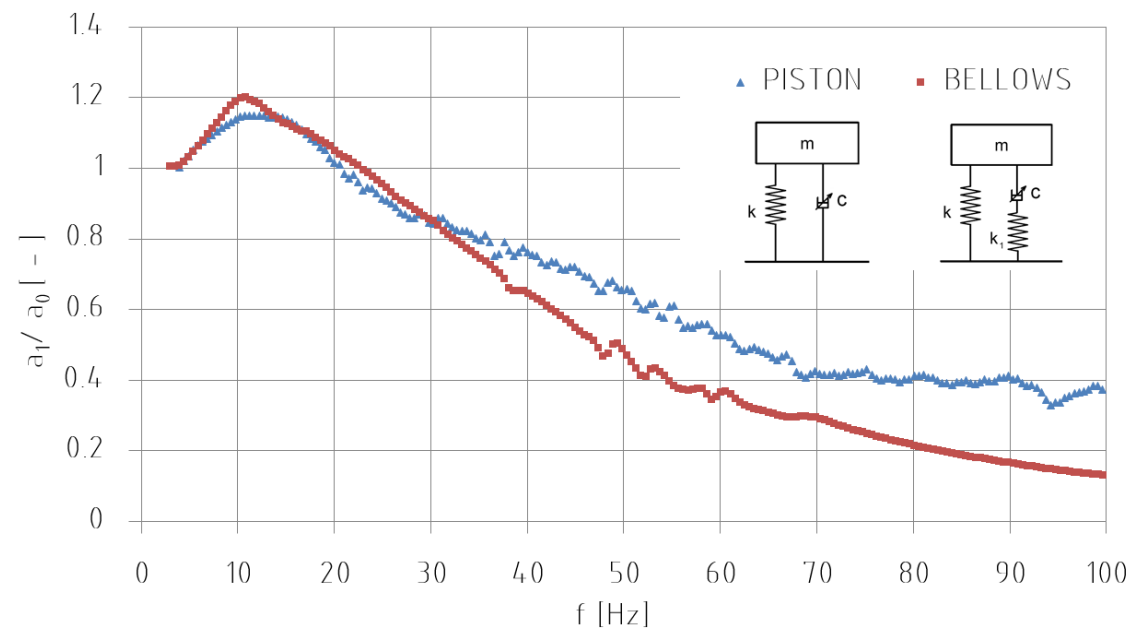
Přenos vibrací experimentální vzpěry

Výhody použití vlnovců v MR tlumiči

- Odstranění tření -> vyšší dynamický rozsah
- Zvýšení dynamického rozsahu -> nižší přenos v řízeném režimu

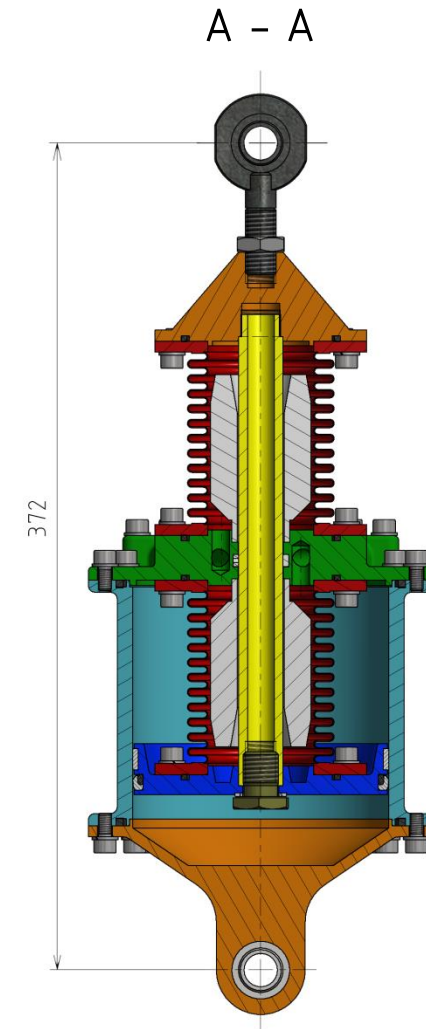
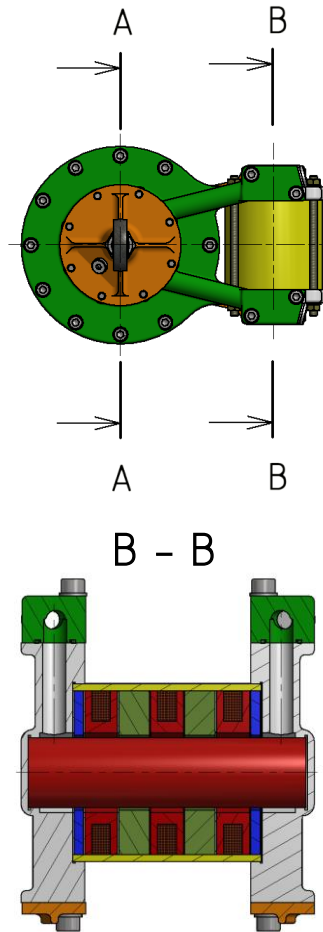
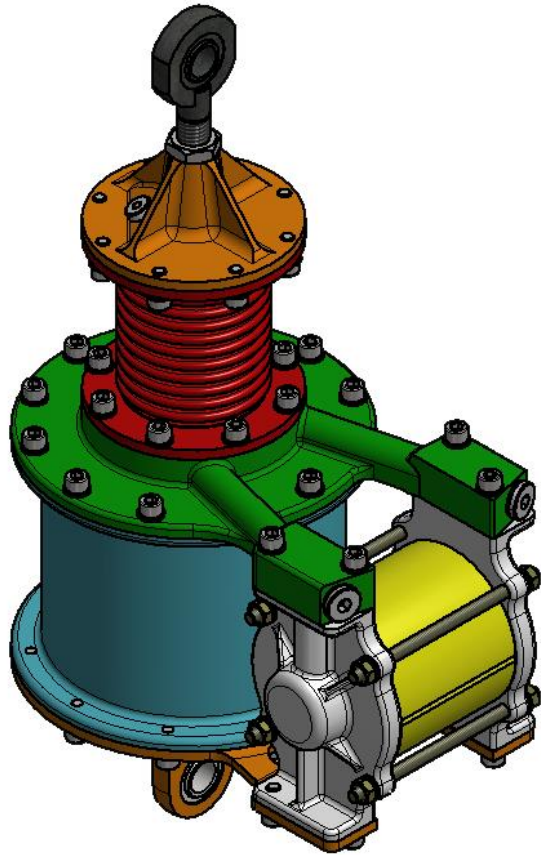


- Pružně uložený tlumič -> snížení přenosu na vyšších frekvencích



Návrh vzpěry pro VIS

Návrh odpovídá požadavkům TRL3
– v další fázi je plánováno detailnější rozpracování
(vedení pístnice, těsnění pístu, odlehčení)



Úroveň rozpracování disertační práce

- Dynamický model + definování optimální parametrů pro MR ventil vzpěry

MACHÁČEK, O.; KUBÍK, M. NOVÁK, P. A new method of magnetorheological damper quality evaluation. In *ENGINEERING MECHANICS 2017*. First edition, 2017. Praha: Institute of Thermomechanics Academy of Sciences of the Czech Republic, 2017. s. 594-597. ISBN: 978-80-214-5497-2.

(WoS)



- Verifikace modelů a optimalizace konstrukčních parametrů vzpěry

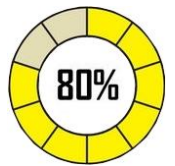
KUBÍK, M.; MACHÁČEK, O.; STRECKER, Z.; ROUPEC, J.; MAZŮREK, I. Hydraulic resistance of magnetorheological damper viscous bypass gap. In *Engineering Mechanics 2016. Engineering mechanics 2014*. first edition. Praha: Institute of Thermomechanics Academy of Sciences of the Czech Republic, 2016. s. 330-333. ISBN: 978-80-87012-59- 8. ISSN: 1805-8248

(WoS)

MACHÁČEK, O.; KUBÍK, M.; MAZŮREK, I.; NOVÁK, P. Axial and Volumetric Stiffness of Metal Bellows. International Conference on Mechatronics and Mechanical Engineering (ICMME 2017), Kuala Lumpur, Malaysia

(50%)

(WoS)



- Zhotovit experimentální vzpěru

MACHÁČEK, O.; KUBÍK, M.; MAZŮREK, I.; STRECKER, Z.; ROUPEC, J. Frictionless Bellows Unit Connected with the Magnetorheological Valve. In *ENGINEERING MECHANICS 2016*. First edition, 2016. Praha: Institute of Thermomechanics Academy of Sciences of the Czech Republic, 2016. s. 354-357. ISBN: 978-80-87012-59- 8.

(WoS)

KUBÍK, M.; MACHÁČEK, O.; STRECKER, Z.; ROUPEC, J.; MAZŮREK, I. Design and Testing of Magnetorheological Valve with Fast Force Response Time and Great Dynamic Force Range. *SMART MATERIALS STRUCTURES*

(IF – 2,769)



- Ověření funkcionality vzpěry experimentem

MACHÁČEK, O.; KUBÍK, M.; MAZŮREK, I.; STRECKER, Z.; ROUPEC, J. Design of a New Frictionless Magnetorheological Damper with High Dynamic Range.

ACTA MECANICA

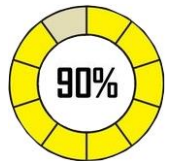
(90%)

(IF – 1.694)

STRECKER, Z.; ROUPEC, J.; MAZŮREK, I.; MACHÁČEK, O.; KUBÍK, M.; KLAPKA, M. Skyhook controlled three parameter semiactive damping system with fast magnetorheological valve, *MECCANICA*

(90%)

(IF – 1.828)



- Technologická finalizace návrhu vzpěry do vibroizolačního systému



Publikace, projekty a mobilita

- Ostatní publikace

STRECKER, Z.; MAZŮREK, I.; ROUPEC, J.; MACHÁČEK, O.; KUBÍK, M.; KLAPKA, M. Design of magnetorheological damper, with short time response. *JOURNAL OF INTELLIGENT MATERIAL SYSTEMS AND STRUCTURES*, 2015, roč. 26, č. 14, s. 1951-1958. ISSN: 1045- 389X. (IF – 1,975)

KLAPKA, M.; MAZŮREK, I.; MACHÁČEK, O.; KUBÍK, M.. Twilight of the EUSAMA diagnostic methodology. *MECCANICA*, DOI: 10.1007/s11012-016-0566-0. ISSN 0025-6455 (IF – 1,949)

- Patentová přihláška

KUBÍK, M.; ROUPEC, J; MAZŮREK, I. STRECKER, Z.; MACHÁČEK O.; KOUTNÝ D.; PALOUŠEK D. *Polotovar jádra obsahujícího pruty z feromagnetického materiálu a způsob jeho vytvoření*. PV 2017-91

- Projekty

ESA – Semi-Active Damping System – FLLP 3
FEKT/FSI-J-16-3694
GAČR 17-10660J
FCH/FSI-J-17-4534

Vývoj nové objemové jednotky pro semi-aktivní magnetoreologický ventil
Studies on Magnetorheological Fluid with High Sedimentation Stability
Stabilizace suspenzí magnetoreologických kapalin přídatkem aditiv

(hl. řešitel STRECKER Z.)
(hl. řešitel LAŠŤŮVKOVÁ M.)

- Mobilita

říjen – listopad 2016

Universite de Nice Sophia-Antipolis

Děkuji vám za pozornost

Ondřej Macháček

ondrej.machacek@vutbr.cz

<http://uk.fme.vutbr.cz/>