

Vývoj semiaktivního odpružení pro kosmonautiku

Ondřej Macháček

Školitel: Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.

Ústav konstruování

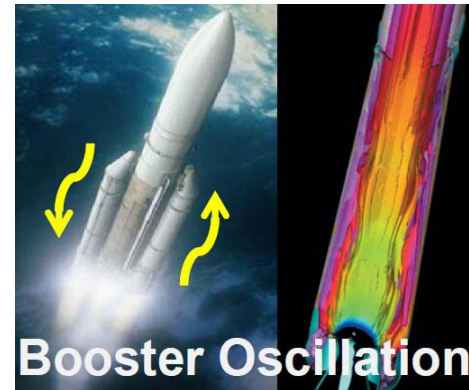
Fakulta strojního inženýrství

VUT v Brně

Pojednání ke státní doktorské zkoušce
1. 3. 2017

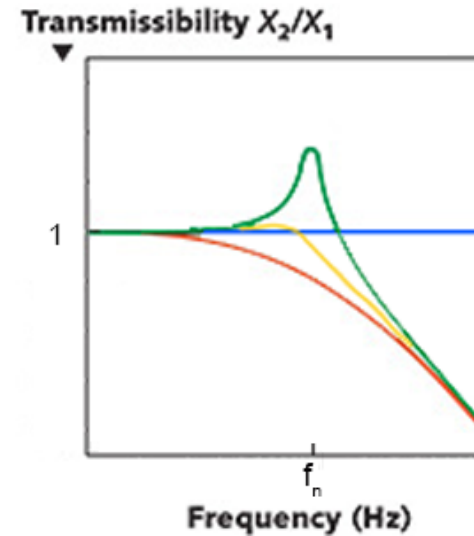
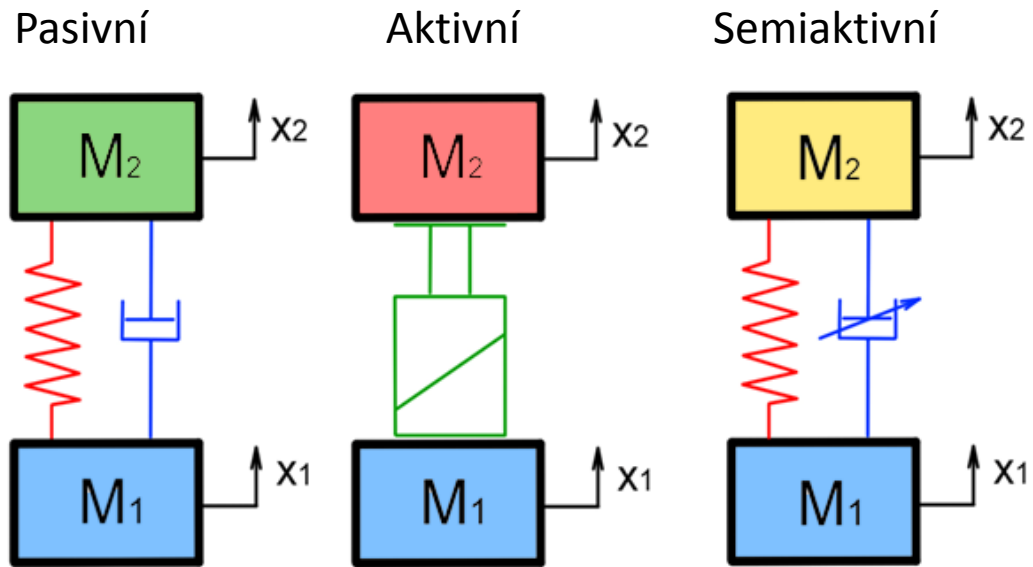
Obsah

- Úvod
- Současný stav poznání
- Aktuální stav řešení práce
- Přehled dosažených výsledků
- Závěr



Úvod

Vibroizolační systémy (VIS)



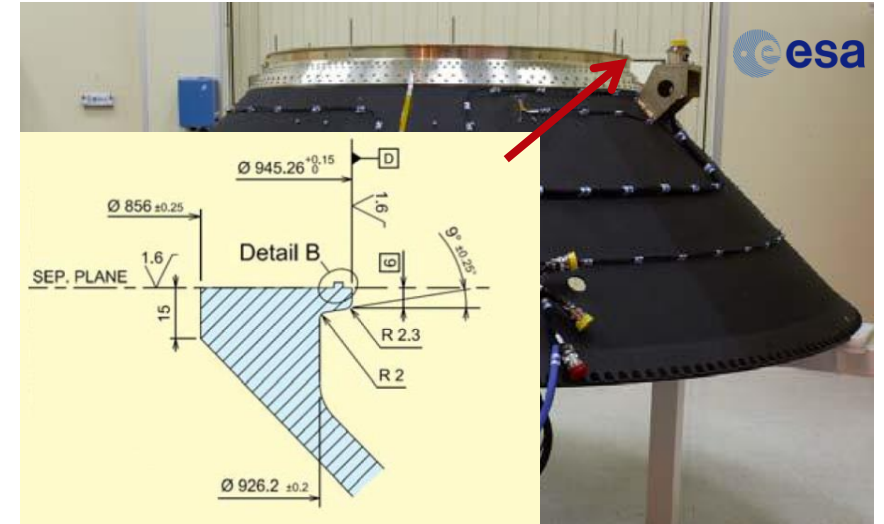
<http://www.laserfocusworld.com>

<http://www.esa.int>

Současný stav poznání – vibroizolační systém

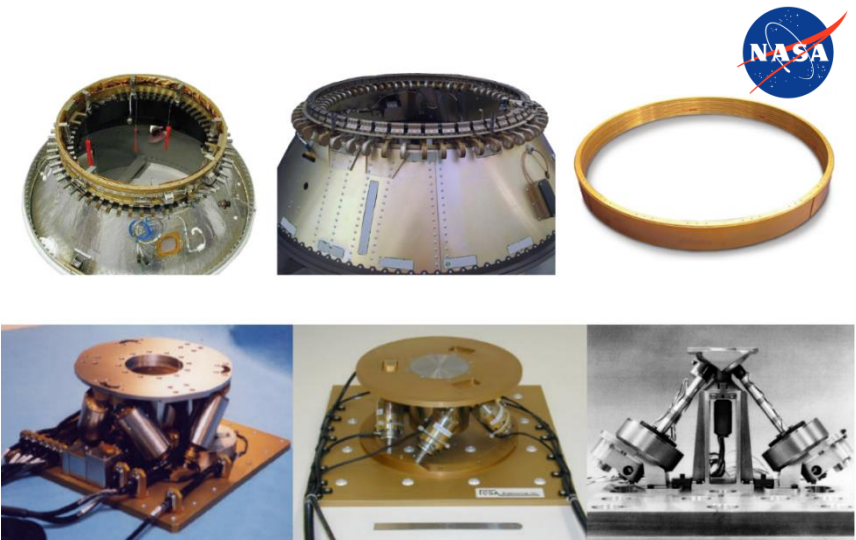
PEREZ E. (2014) Ariane 5: User's Manual.

- 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.

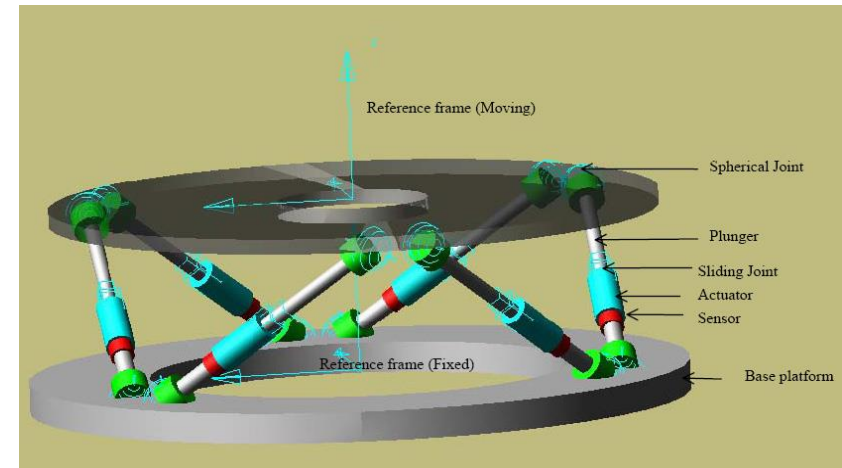
- Celkový náklad – **pasivní VIS** (softride / softflex)
- Citlivé části – doplněno **aktivním VIS**



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)

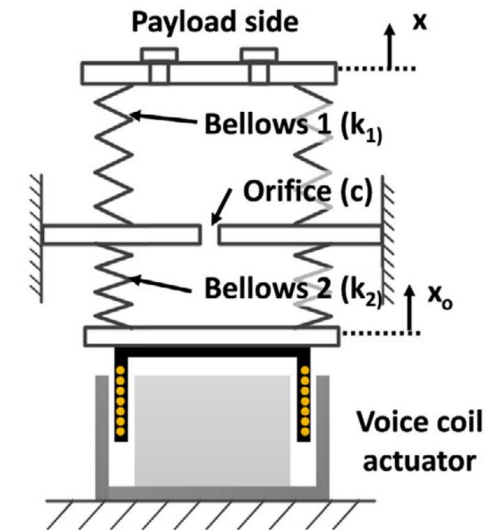


LEE a kol. (2015) Experimental study on on-orbit and launch environment vibration isolation performance of a vibration isolator using bellows and viscous fluid

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

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

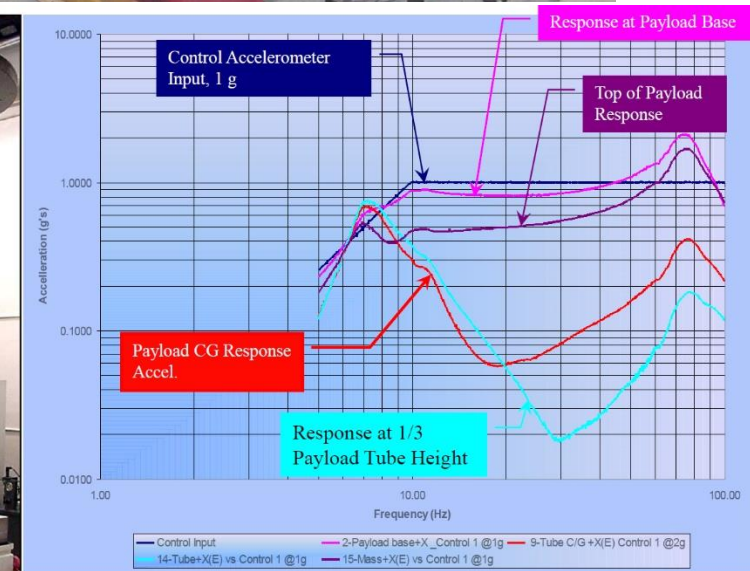
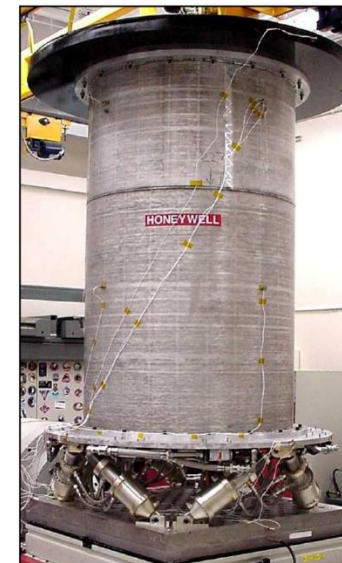
$t = -10$ až $+50^\circ\text{C}$
(změna tlumení)



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



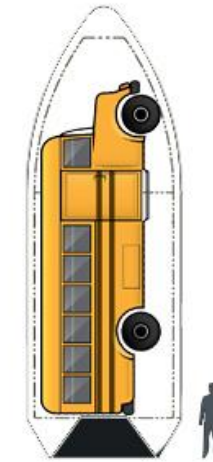
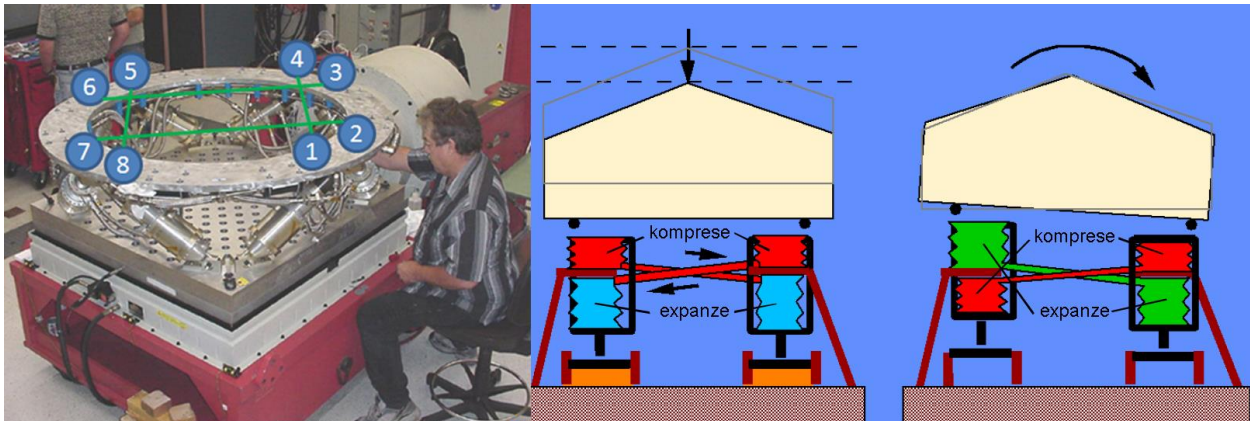
Současný stav poznání – stabilizátory

Orientace nákladu v kosmickém nosiči určuje jeho náchylnost ke kolébání

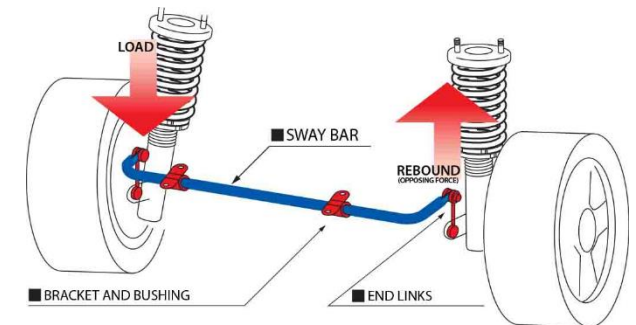
- Tuhost vzpěr Stewartovy plošiny ovlivňuje příčný i podélný posuv
- Poměr tuhostí lze regulovat
 - sklonem vzpěr
 - použitím stabilizátoru

RUEBSAMEN, D. T., (2003)

Navazuje na patent US5803213 A



<http://www.spacex.com>

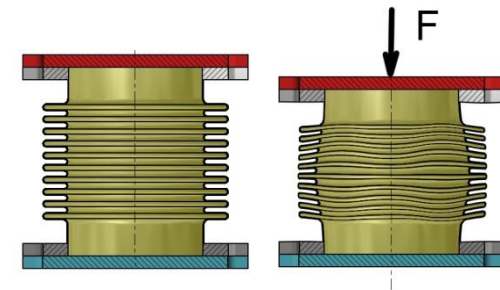
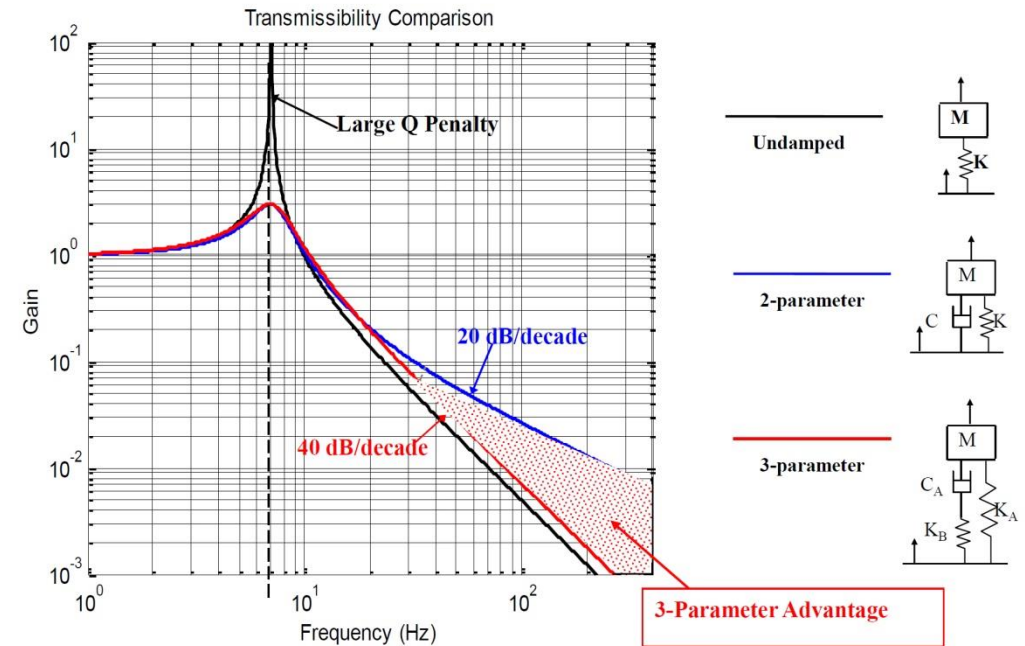
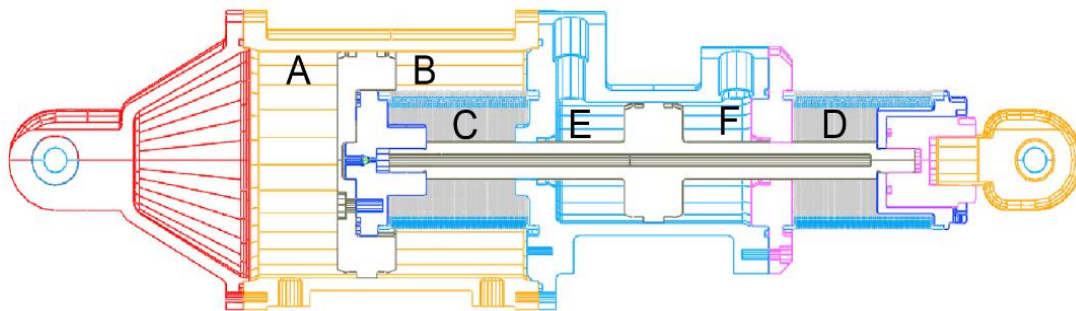


<http://www.cuscousainc.com>

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)



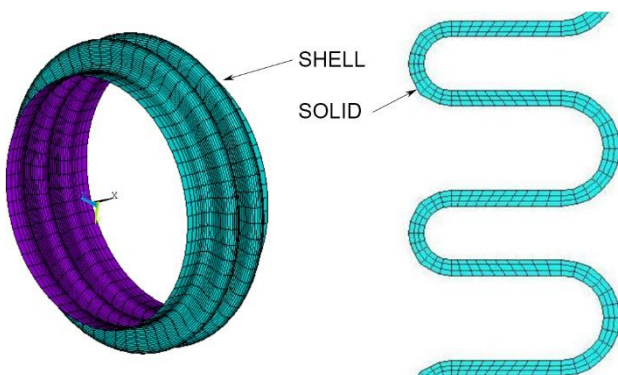
Současný stav poznání – ocelové vlnovce

Parametry vlnovců

- Axiální tuhost
- Radiální tuhost
- Maximální dovolený tlak
- **Chybí informace o objemové tuhosti**



<http://www.witzenmann.com>



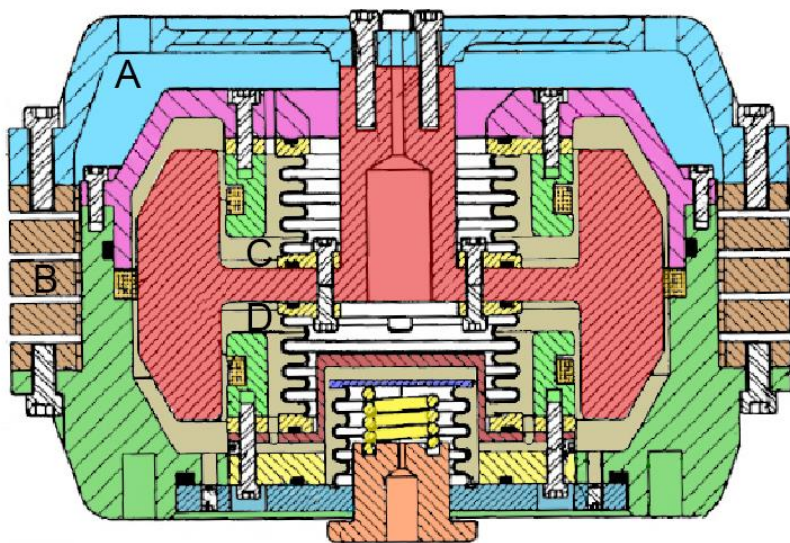
THAKKAR, H., R. (2011) Study of design aspects of expansion joints with metallic bellows and their performance evaluation

- 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

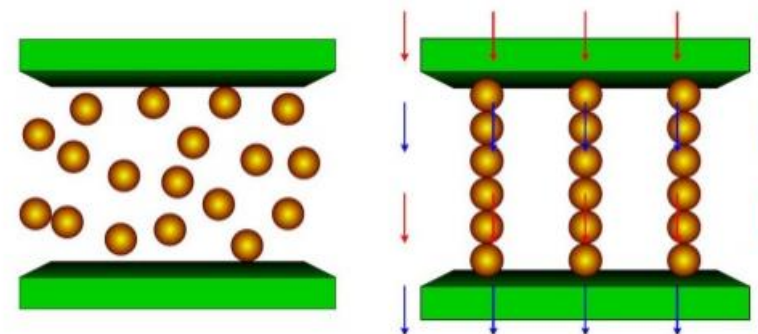
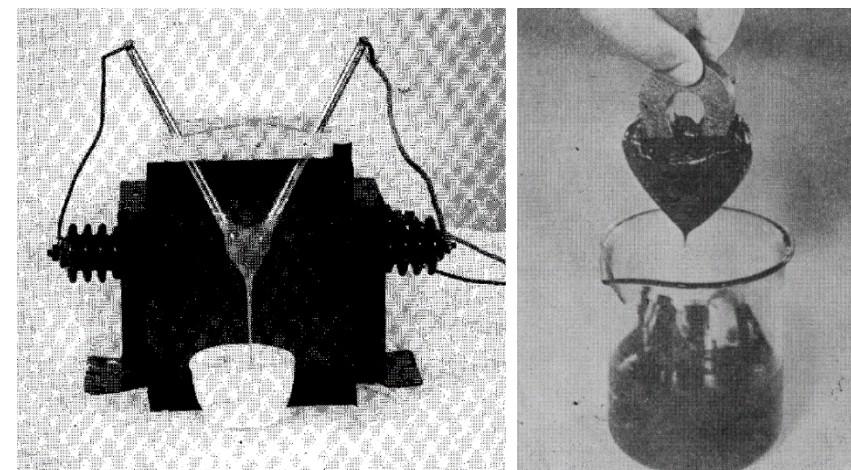
KELSO, J. & E. LINDER. (2004) Magnetorheological Fluid Vibration Isolator US20040195061 A1

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



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

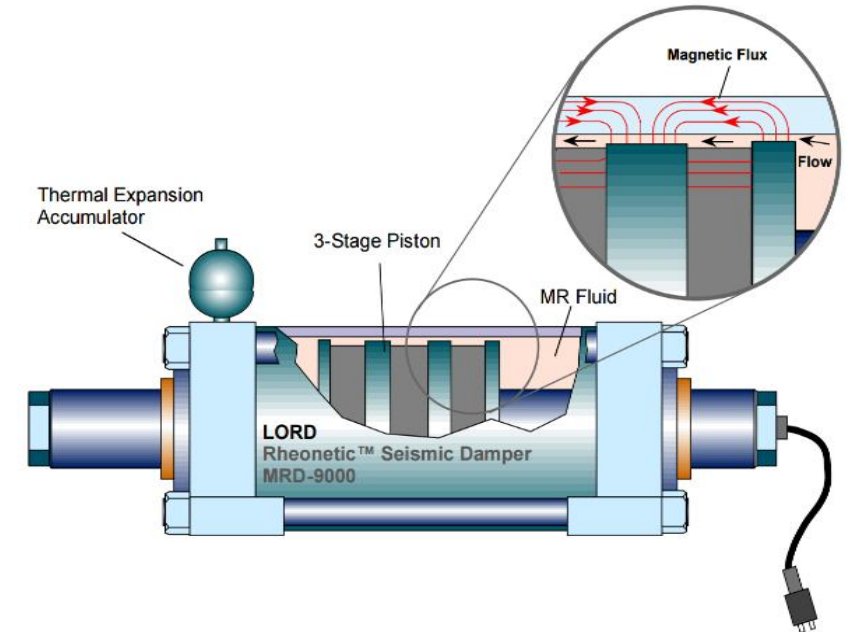
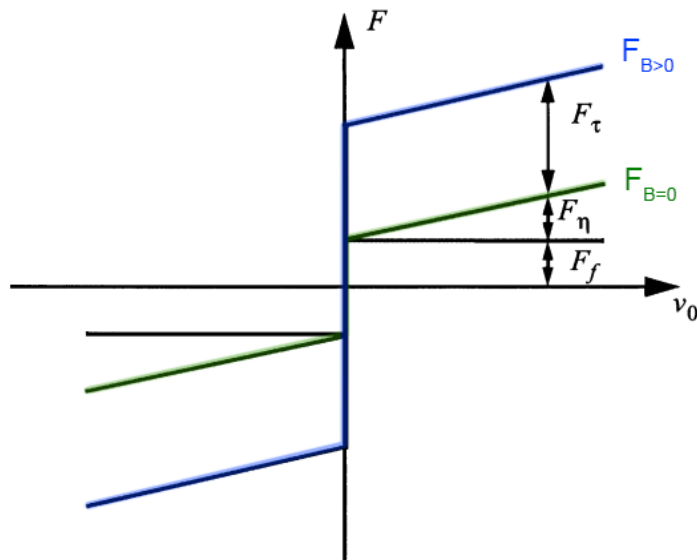
RABINOW, J. (1948) The Magnetic Fluid Clutch



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
- Max. tlumicí síla: 180 kN
- Dynamický rozsah cca 10



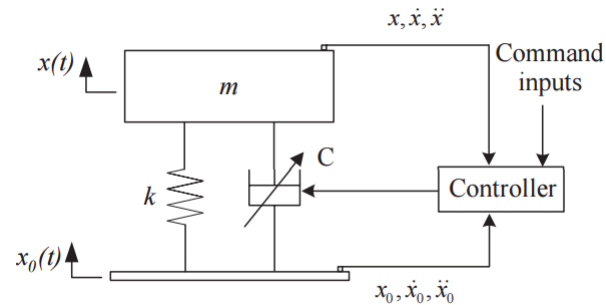
Dynamický rozsah

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

Současný stav poznání – Magnetoreologické tlumiče

LIU a kol. (2005) A comparison of semi-active damping control strategies for vibration isolation of harmonic disturbances

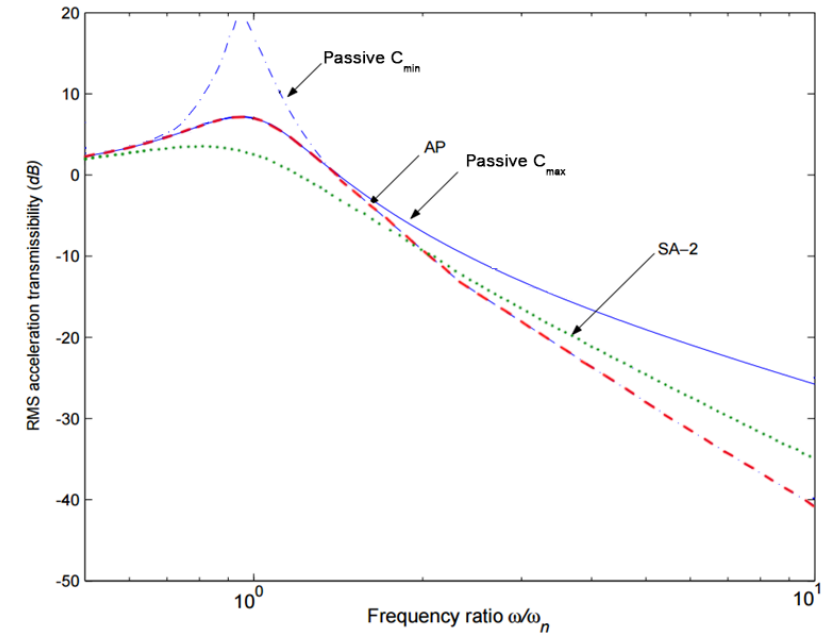
- Porovnání algoritmů na základě přenosových funkcí
- Jednoduchý lineární systém s 1 DOF



Adaptive-passive control (AP)

$$RMS(\ddot{x}) \geq RMS(\ddot{x}_0) \quad \longrightarrow \quad C = C_{max}$$

$$RMS(\ddot{x}) < RMS(\ddot{x}_0) \quad \longrightarrow \quad C = C_{min}$$



ON/OFF Skyhook control (SA-2)

$$\ddot{x} \cdot (\dot{x} - \dot{x}_0) \geq 0 \quad \longrightarrow \quad C = C_{max}$$

$$\ddot{x} \cdot (\dot{x} - \dot{x}_0) < 0 \quad \longrightarrow \quad C = C_{min}$$

Zhodnocení řešerše -> koncepční návrh VIS

Semi-aktivní VIS

- výrazně nižší přenos než pasivní
- nižší energetické nároky než aktivní VIS
- využito bude MR tlumičů

Stewartova plošina

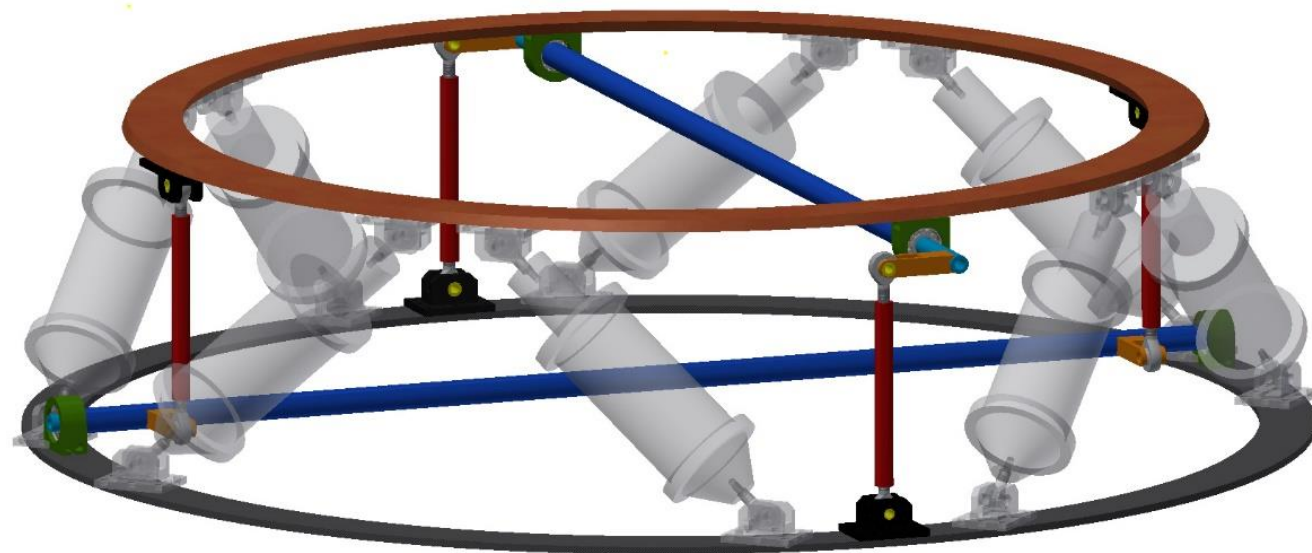
- mechanismus s 6 DOF
- nutno doplnit stabilizátorem

Stabilizátor

- mechanický neovlivní tlumení v ax. směru

Vlnovce

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



Určení parametrů MR vzpěry

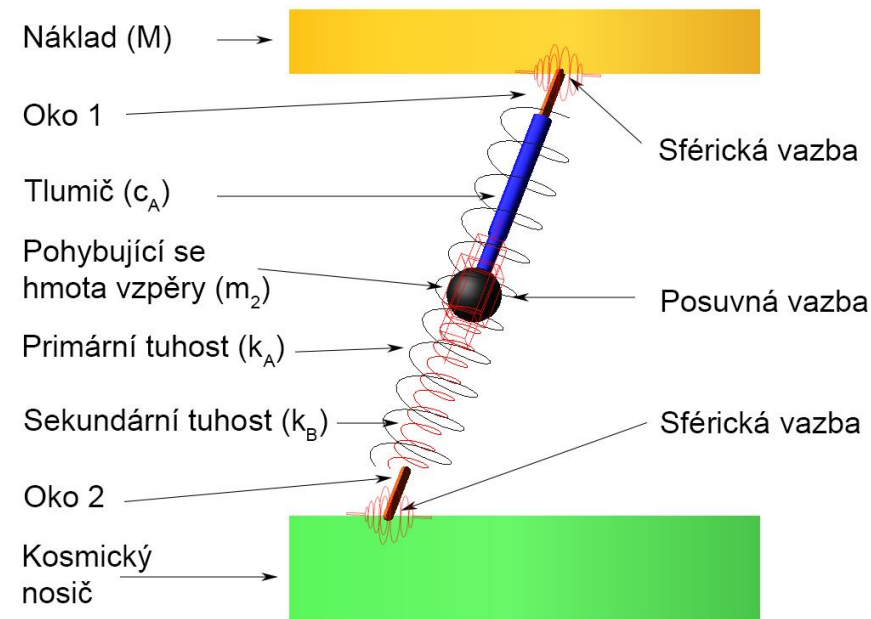
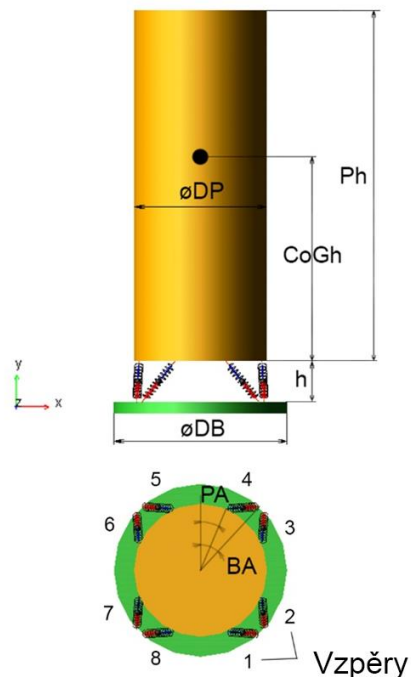
Parametrický model v MultiBody systému

Software: ADAMS view

Verifikace: model v software Matlab (Doc. Krejsa)

Porovnáním přenosových funkcí umožňuje nalézt:

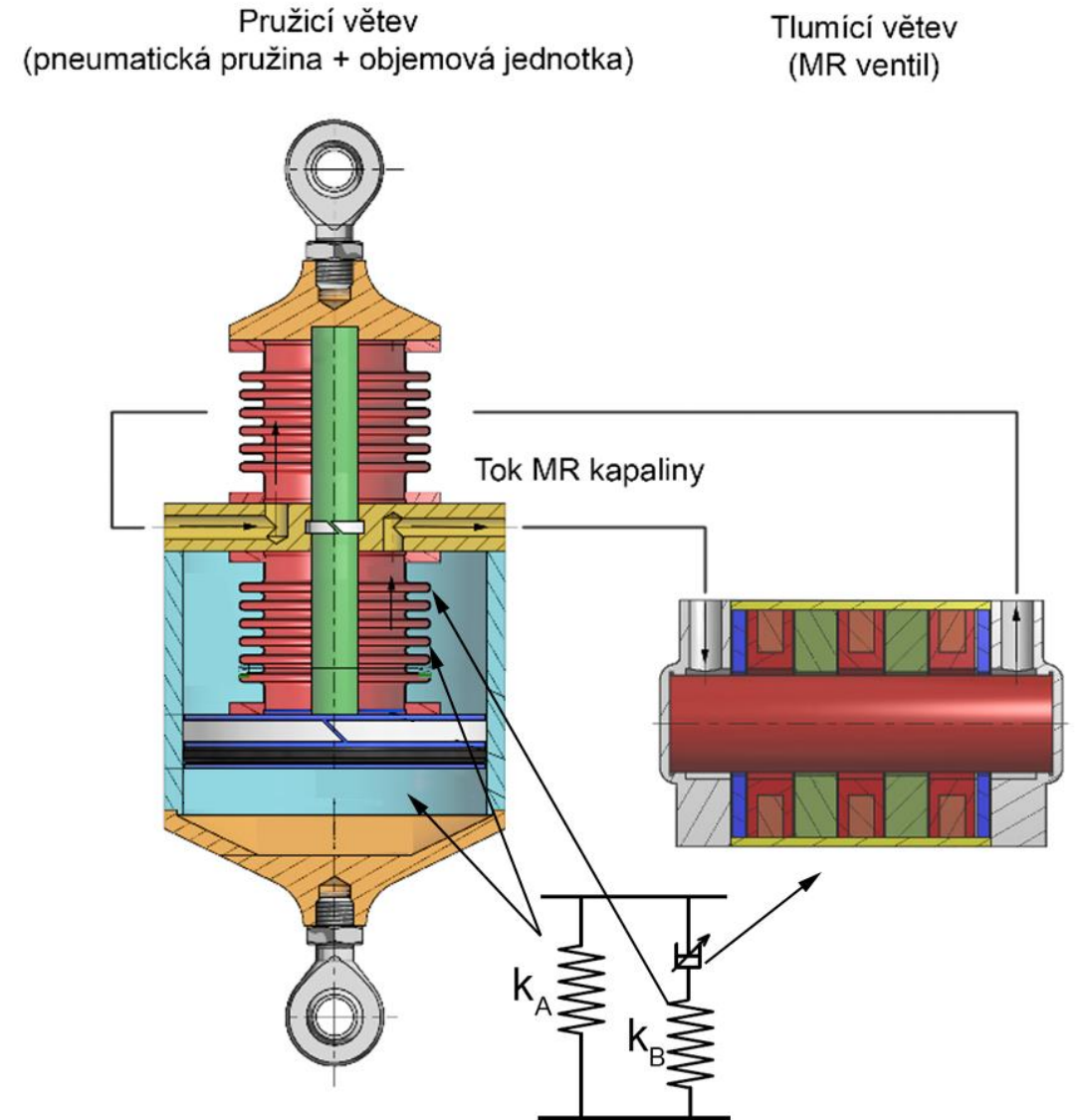
- Vhodnou geometrii VIS
- Vhodné tlumení MR vzpěry
- Vhodná primární a sekundární tuhost vzpěry



Koncepční návrh MR vzpěry

MR vzpěra

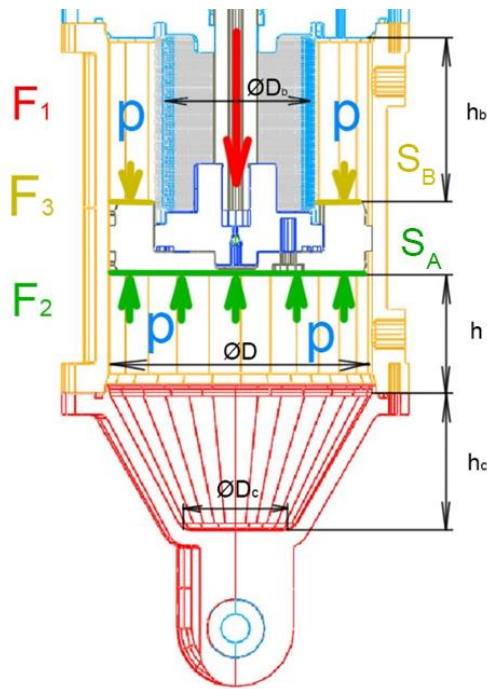
- Rovnotlaká pneumatická pružina
- Pružně uložený tlumič díky ocelovým vlnovcům
- Externě umístěný MR ventil



Primární tuhost - k_A

Pneumatická pružina

- Rovnotlaká
- Návrh založen analytickém výpočtu



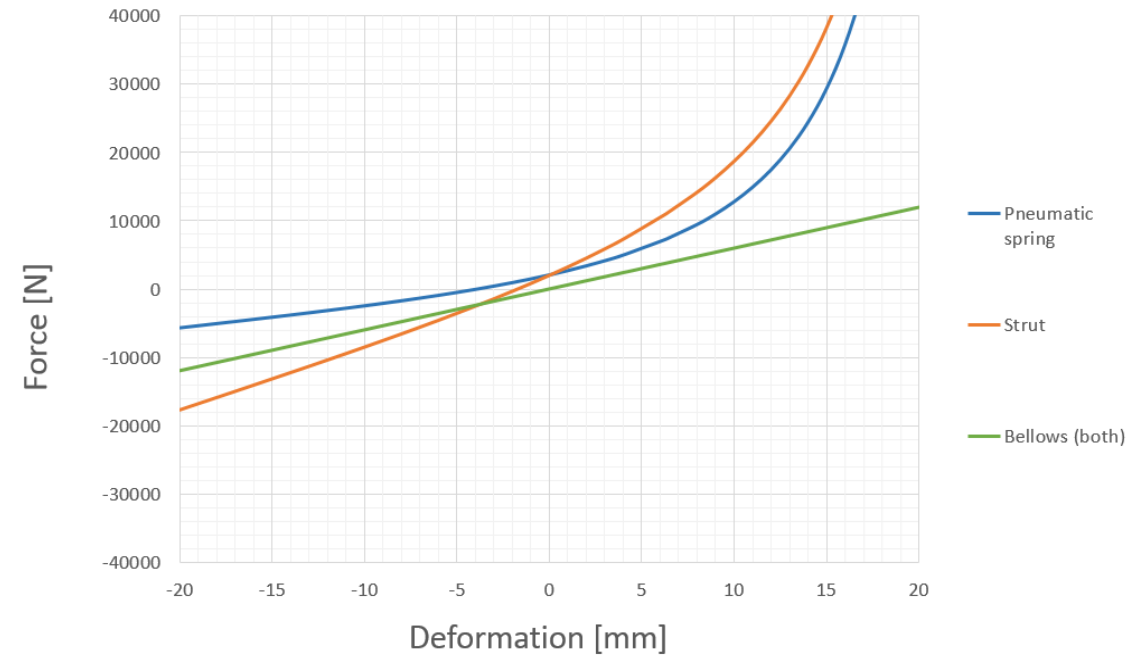
$$F_1 = F_2 - F_3$$

$$F_1 = m \cdot g$$

$$F_2 = p \cdot S_A$$

$$F_3 = p \cdot S_B$$

Závislost síly na stlačení MR vzpěry



Axiální tuhost vlnovců – katalog výrobce

Sekundární tuhost - k_B

MKP model

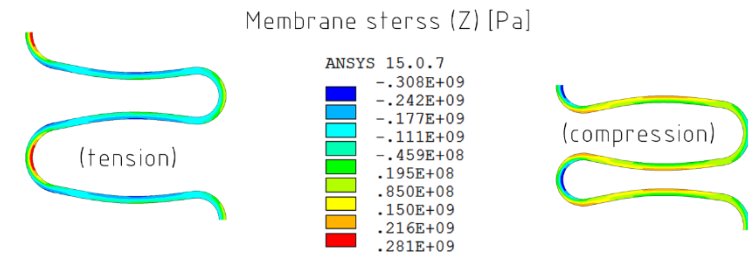
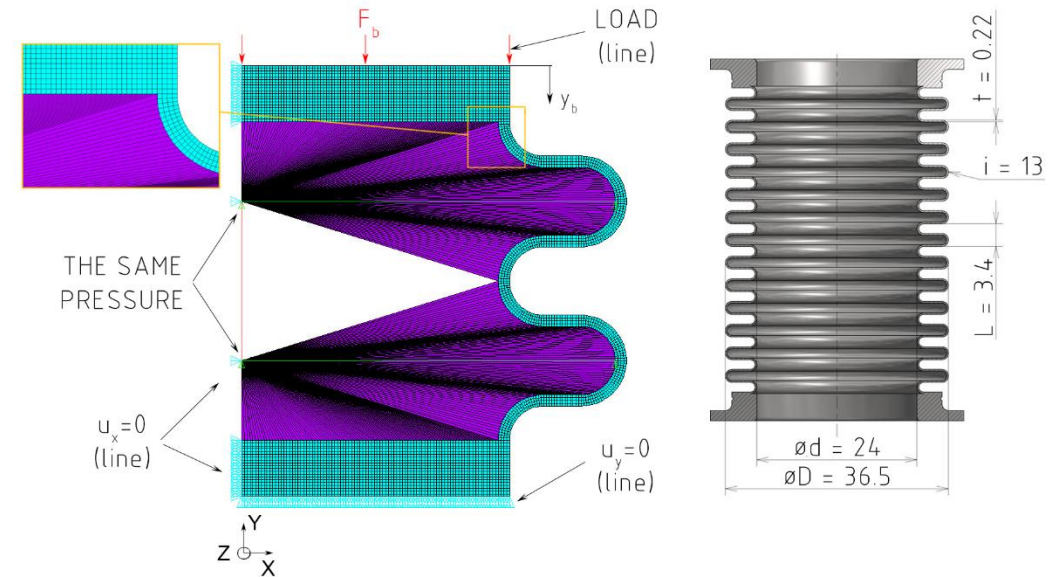
Spolupráce s ústavem mechaniky těles – Ing. Michal Peč

Parametry modelu

Symetrie:	Osa Y
Typ prvků (obal)	SOLID 182
Typ prvků – (náplň)	HSFLD 241
Jednotky	Pa, m
Řešení	nelineární

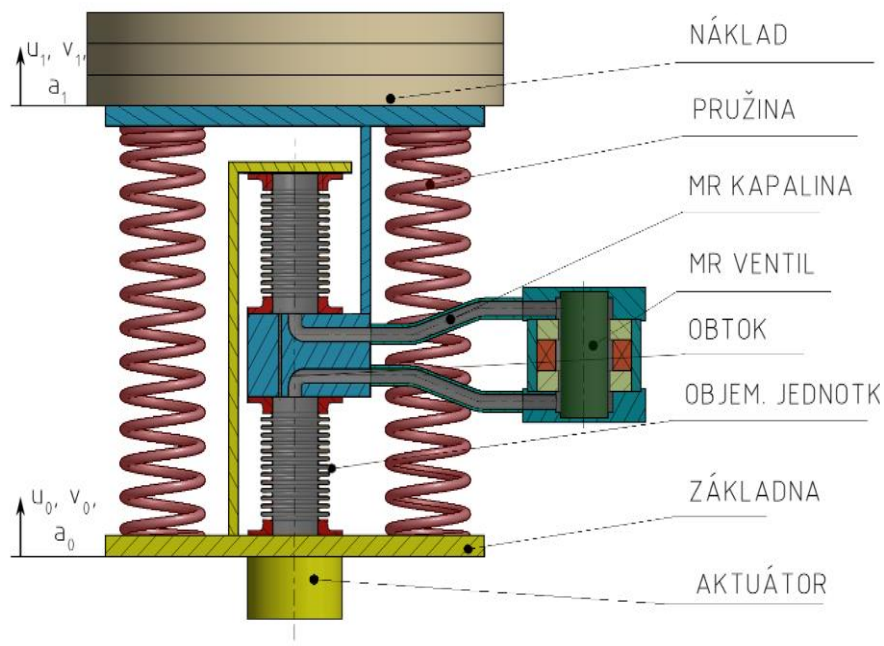
Problém – nepřesná tloušťka stěny

- Katalog – tloušťka polotovaru – 0.25 mm
- Skutečnost – nižší hodnota (tváření) – 0.22 mm
- Řešení – zúžení plechu určeno empirickým výpočtem (výrobce)

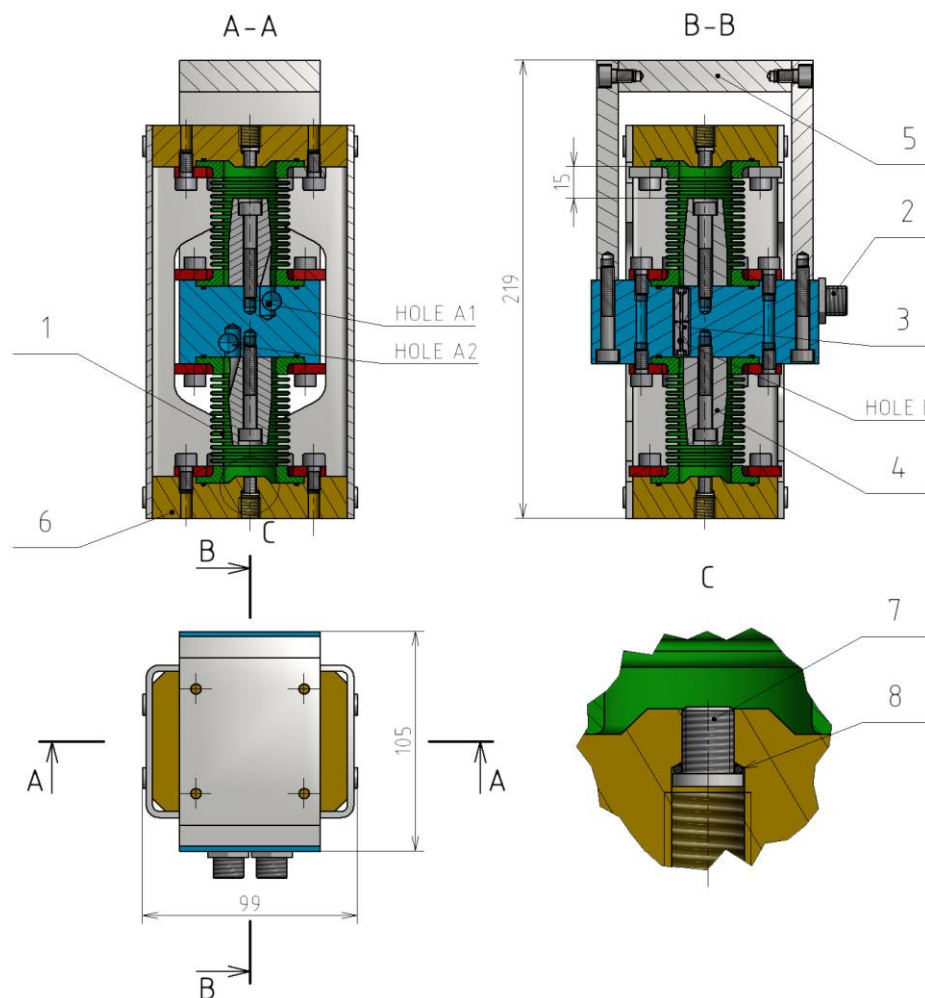


Experimentální vzpěra

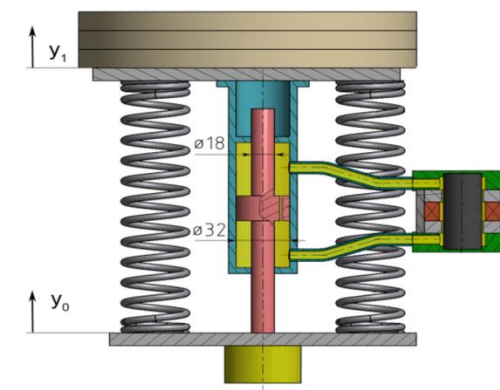
Schéma experimentální vzpěry (vlnovce)



Objemová jednotka s vlnovci



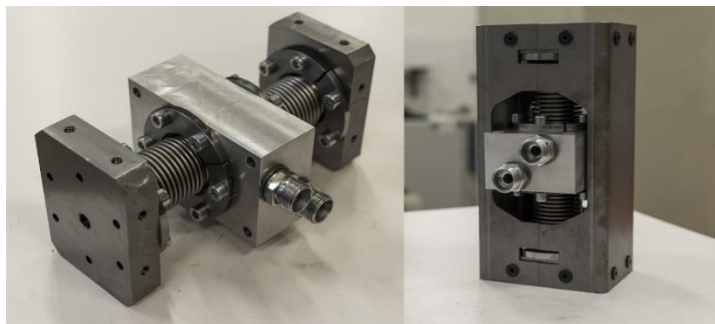
Předchozí návrh (píst ve válci)



Experimentální vzpěra

Objemová jednotka

financováno: FEKT/FSI-J-16-3694

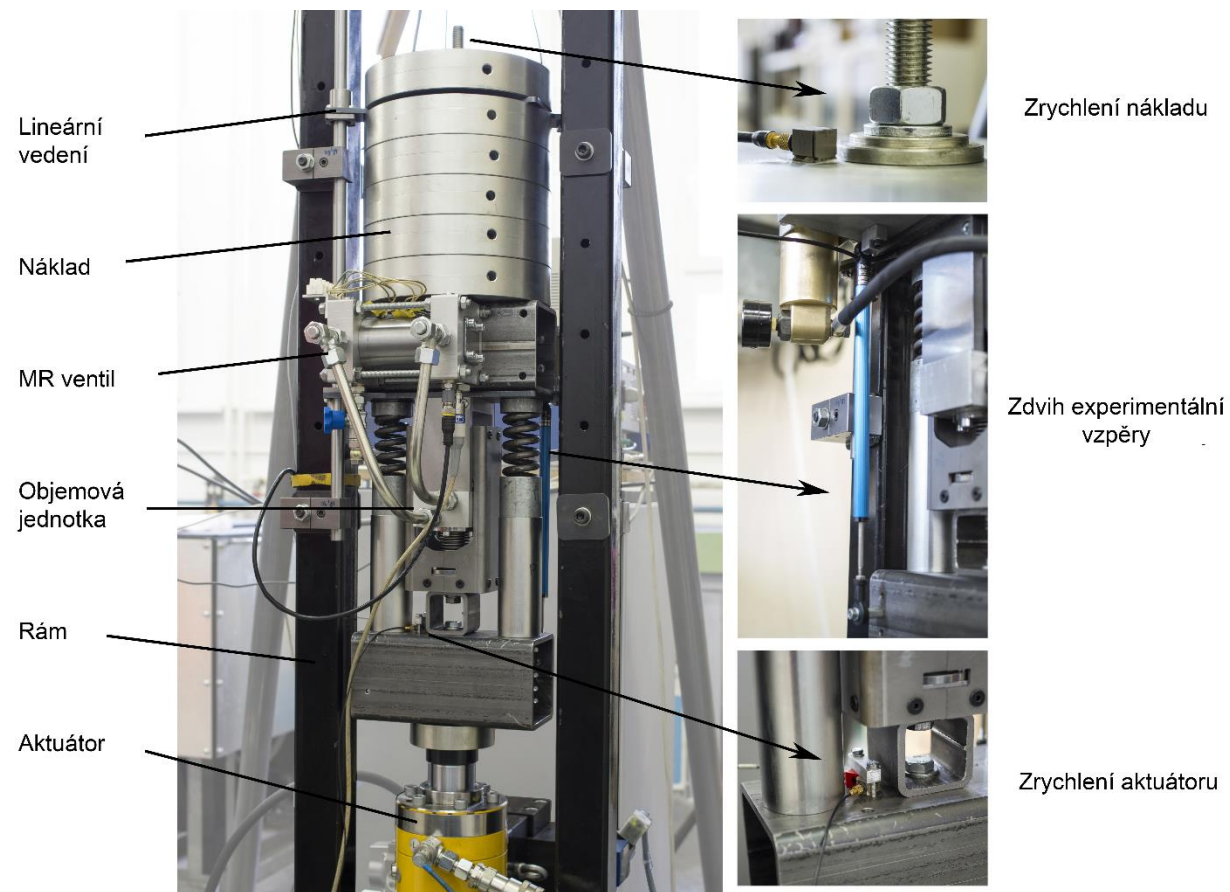


MR ventil

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



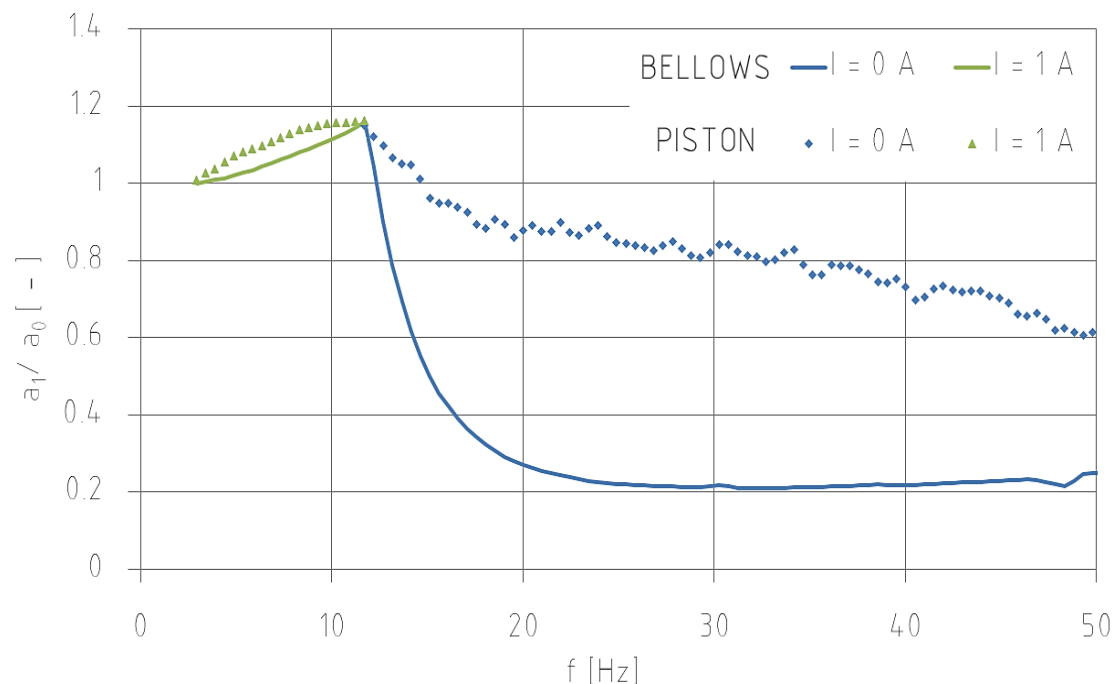
Měření přenosu MR vzpěry
osazení snímači



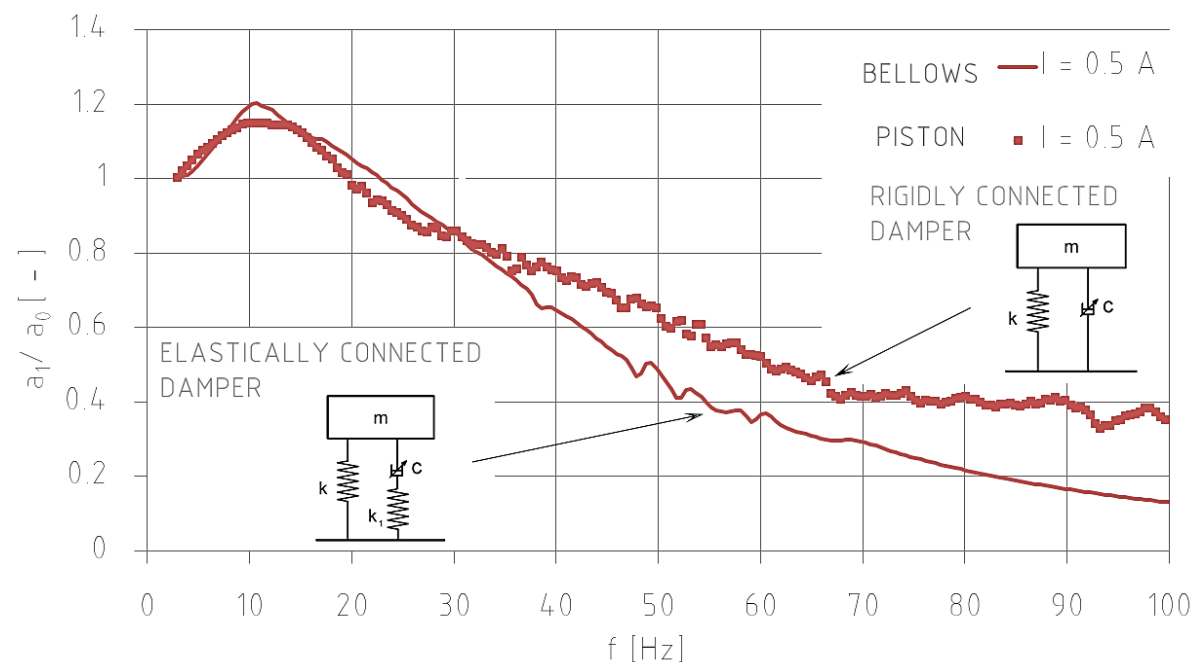
Přenos vibrací experimentální vzpěry

Výhody použití vlnovců v MR tlumiči

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



- Pružně uložený tlumič -> snížení přenosu na vyšších frekvencích



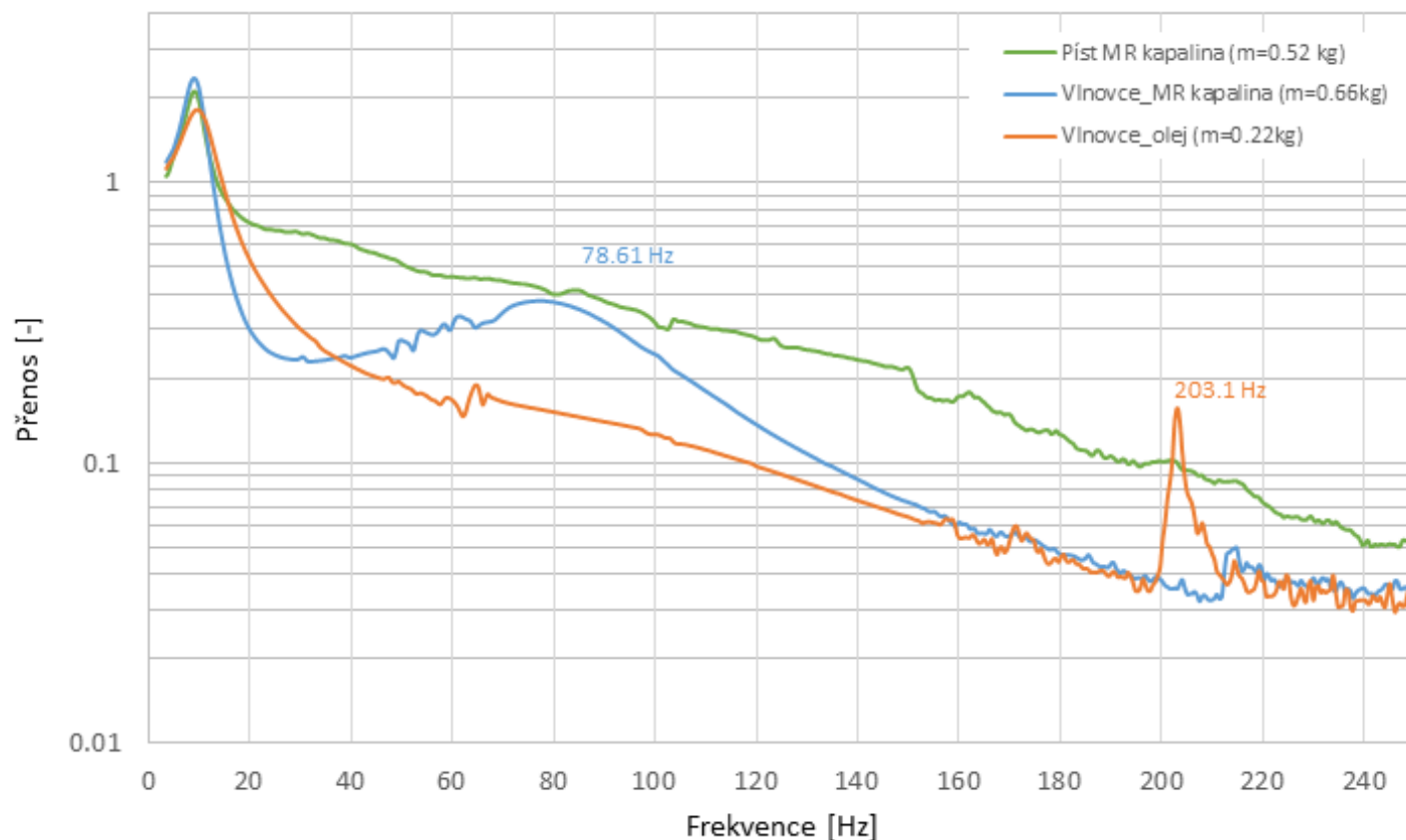
Přenos vibrací experimentální vzpěry

Problém s použitím vlnovců v MR tlumiči

- Vznik dalšího rezonančního vrcholu (v simulacích se neobjevuje)
- Hypotetická příčina kmitání hmotné kapaliny v pružném systému

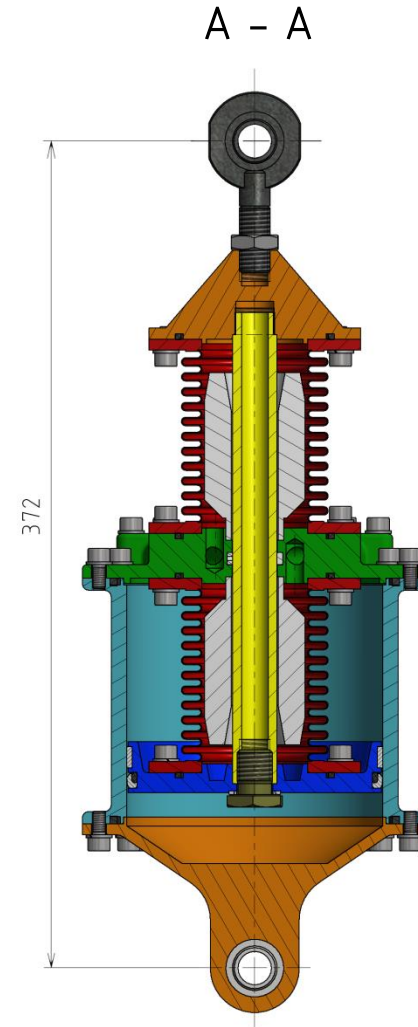
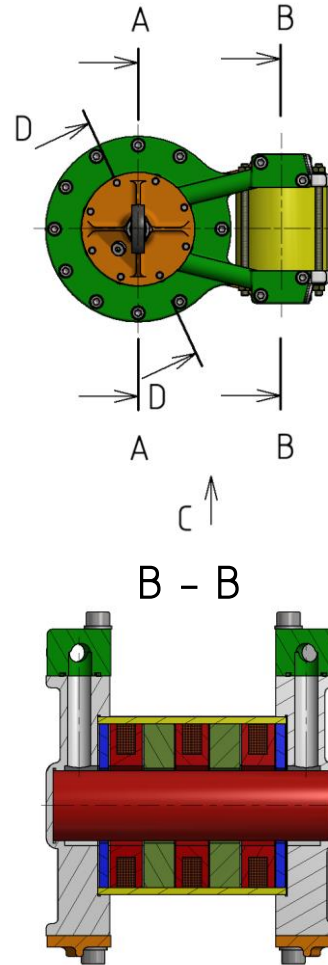
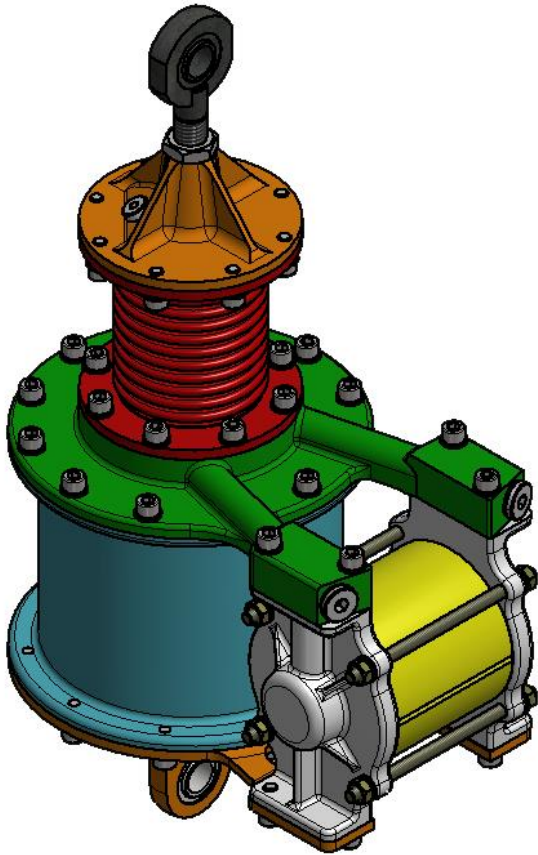
$$f = \frac{\sqrt{\frac{1}{k_A} + \frac{1}{k_B}}}{2 \cdot \pi} \cdot m$$

$f_{OLEJ} = 211 \text{ Hz}$
 $f_{MR} = 116 \text{ Hz}$



Návrh vzpěry pro VIS

Návrh odpovídá požadavkům FLPP3
– v další fázi je plánováno detailnější rozpracování



Publikace, projekty a mobilita

- Publikace

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)

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)

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)

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 (patentová přihláška)

- Projekty

FEKT/FSI-J-16-3694

GAČR 17-10660J

TRIO-MPO FV20456 (žádost)

FCH/FSI-J-17-4534 (žádost)

Vývoj nové objemové jednotky pro semi-aktivní magnetoreologický ventil

Studies on Magnetorheological Fluid with High Sedimentation Stability

Vývoj magnetoreologického systému tlumení s rychlou odezvou pro podvozky kolejových vozidel

Stabilizace suspenzí magnetoreologických kapalin přísadkami

(hl. řešitel STRECKER Z.)

(hl. řešitel MAZŮREK I.)

(hl. řešitel LAŠTŮVKOVÁ 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/>