



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
Ústav KONSTRUOVÁNÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VÝVOJ SEMIAKTIVNÍHO ODPRUŽENÍ PRO KOSMONAUTIKU

DEVELOPEMENT OF SEMI-ACTIVE SUSPENSION FOR SPACE APPLICATIONS

PROJEKT DISERTAČNÍ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. ONDŘEJ MACHÁČEK

DOC. ING. IVAN MAZŮREK, CSC.

BRNO 2015

OBSAH

1	NÁZEV	3
2	KLÍČOVÁ SLOVA	3
3	ÚVOD	4
4	SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	5
4.1	Vibroizolační systémy pro kosmonautiku.....	5
4.1.1	CARANTU, I, SHOVE, C. Overview of payload vibration isolation systems. [1]	5
4.1.2	XIUCHANG, H, JINGYA, S, HONGXIGH, H a ZHIYI, Z. Modeling and Optimization of Octostrut Vibration Isolation Platform by FRF-Based Substructuring Method. [10].....	6
4.2	Vzpěry pro pasivní vibroizolační plošiny pro kosmonautiku	7
4.2.1	PORTER, D. Advanced 1.5 Hz passive viscous isolation system [5]... ..	7
4.2.2	D.T. Ruebsamen, Evolved launch vibration isolation system (ELVIS) demonstration unit test results [6].....	9
4.3	Ocelové vlnovce.....	10
4.3.1	DINESH BABU, P. Analysis of Static Mechanical Behaviour of Metal Bellows Using Finite Element Modeling [2]	10
4.3.2	Mažeika, J. Research of the flexible bellow with the magnetorheological fluid. [4]	11
4.4	Magnetoreologické tlumiče.....	13
4.4.1	YANG, G. Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. [11]	13
4.4.2	STRECKER, Z. Limiting factors of the response time of the magnetorheological damper [7]	15
4.4.3	WANG, Q. A novel Double-Piston Magnetorheological Damper for Space Truss Structures Vibration Suppression [8]	16
4.4.4	Kelso, J. Magnetorheological Fluid Vibration Isolator [3].....	18
5	ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ KRITICKÉ REŠERŠE	20
6	PODSTATA A CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	21
7	VĚDECKÁ OTÁZKA A PRACOVNÍ HYPOTÉZA	22
8	ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ VĚDECKÉ METODY	23
9	ČASOVÝ ROZVRH A ETAPY ŘEŠENÍ	24
10	ODŮVODNĚNÍ NUTNOSTI A POTŘEBNOSTI ŘEŠENÍ DANÉ PROBLEMATIKY	25
11	POPIS NAVRHOVANÝCH KONCEPČNÍCH A METODICKÝCH POSTUPŮ	26
12	SPOLUPRÁCE S INSTITUCEMI	28
13	PŘEDPOKLÁDANÉ NÁKLADY SPOJENÉ S ŘEŠENÍM	28
14	CHARAKTERISTIKA PŘEDPOKLÁDANÉHO VÝSLEDKU	29
15	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	30
16	SEZNAM OBRÁZKŮ	32

1 NÁZEV

1

Vývoj semi-aktivního odpružení pro kosmonautiku

Development Of Semi-Active Suspension For Space Applications

2 KLÍČOVÁ SLOVA

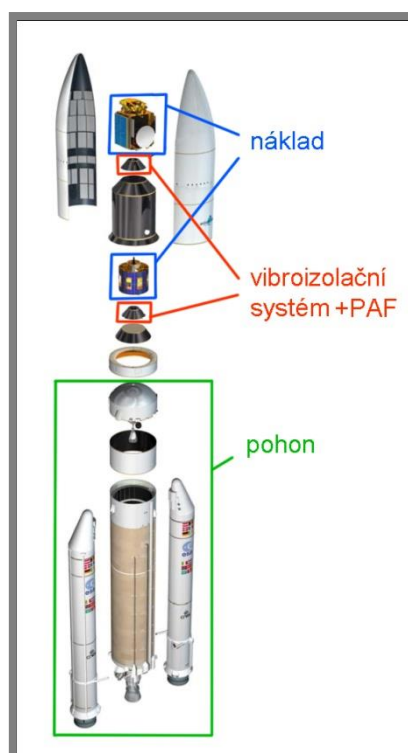
2

Magnetoreologický tlumič, semi-aktivní, vzpěra, vlnovec,

Magnetorheological damper, semi-active, strut, bellows

3 ÚVOD

Satelity jsou jednou z nejpropracovanějších věcí dnešní vědy. Předpovídají počasí, využívají se pro telekomunikaci, navigaci atd. Od vypuštění Sputniku v roce 1957 zaznamenaly výrazný pokrok, na rozdíl od jejich nosičů – raket. Především princip pohonu se od té doby příliš nezměnil. Při jejich startu, letu nebo oddělování modulů vzniká velké množství vibrací a rázů. Ty mohou být pro cenný náklad smrtící. Proto je nutné vibrace tlumit či izolovat a zabránit tak jejich přenosu z nosiče na náklad. K těmto účelům se používají vibroizolační systémy, viz Obr. 1



Obr. 1 Kosmický nosič Ariane 5 (ESA) [12]

Iniciátor projektu – společnost ESA hodlá vyvinout semi-aktivní izolační systém využívající MR tlumičů. Důležitými faktory pro konstruování v kosmonautice jsou hmotnost, spolehlivost, ale také těsnost. Ve stavu beztlíže by set totiž i sebemenší množství pracovní kapaliny mohlo dostat do blízkosti elektroniky a poškodit ji.

V rámci diplomové práce bylo zpracovááno podobné téma, některé z poznatků je tedy možné využít. Nicméně v diplomové práci s takto multioborovým tématem nebylo možné zacházet příliš do detailů. Toto je možné napravit použitím vhodných vědeckých metod v rámci práce dizertační.

4 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

4

4.1 Vibroizolační systémy pro kosmonautiku

4.1

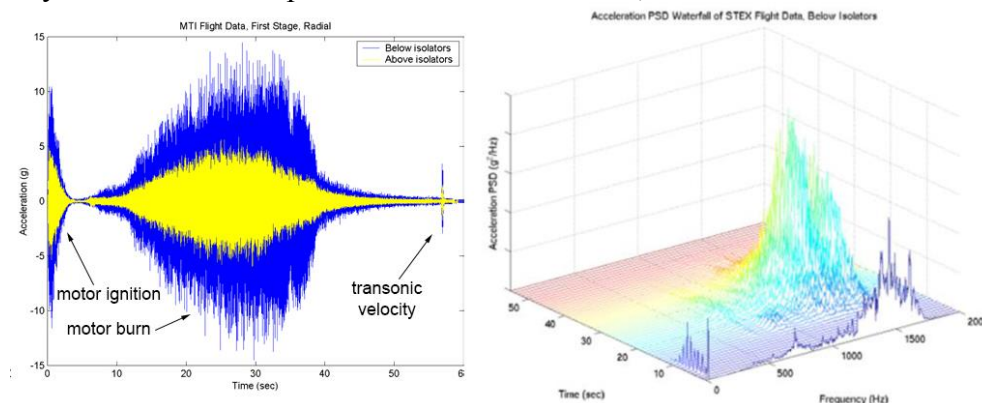
4.1.1 CARANTU, I, SHOVE, C. Overview of payload vibration isolation systems. [1]

4.1.1

Jak z názvu vyplývá, článek uvádí přehled používaných systémů pro eliminaci vibrací (do roku 2005 pro lety kosmických nosičů NASA). V úvodní části autor definuje podmínky pro náklad z hlediska vibrací, jejichž hlavním zdrojem je:

- Zážeh motoru, turbulence a vysokorychlostní proudění spalin během startu
- Běh motoru a let podzvukovou rychlostí
- Rázy během překonávání rychlosti zvuku
- Činnost trysek pro korekci směru letu

Vhodný vibroizolační adaptér dokáže vibrace zmírnit, viz Obr. 2.



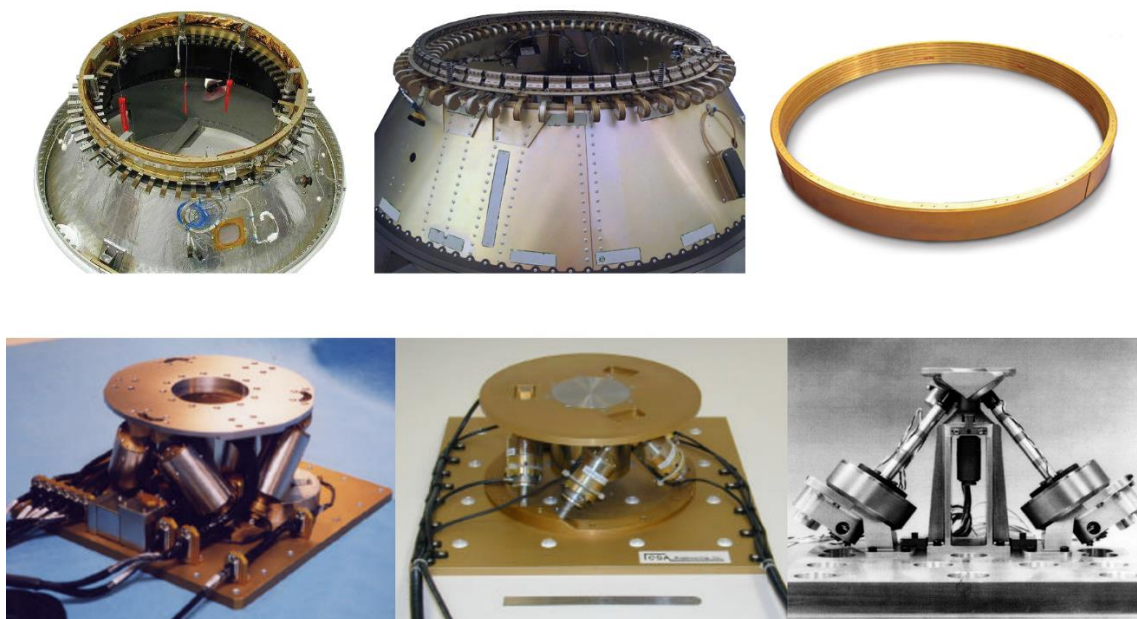
Obr. 2 Záznam zrychlení v podélném směru při letu nosiče Taurus

Frekvenční spektrum vibrací během letu je možné vidět na Obr. 2 vpravo.

V druhé části článku Carantu rozděluje používané systémy podle toho, zda je pro eliminaci vibrací energii ze systému pouze odebírají – **pasivní**, nebo také dodávají – **aktivní**. Kvůli této skutečnosti byly pro celkovou izolaci nákladu (whole-spacecraft isolation) vždy využity pasivní systémy, např. produkty s označením softride, viz Obr. 3 nahoře. Často byly tyto systémy ještě doplněny systémem ShockRing (vpravo nahoře), který je navržen pro izolaci vibrací a rázů o frekvencích nad 100 Hz, zbývající dva systémy jsou naladěny na frekvence nižší.

Aktivní systémy, viz Obr. 3 dole, byly dimenzovány jako přídavné izolátory méně hmotných zařízení satelitu - optická zařízení, řídicí elektronika atd. Kromě eliminace vibrací aktivní systémy také slouží k polohování daných zařízení. A na rozdíl od svých pasivních kolegů neshoří během návratu rakety v atmosféře, ale musí

fungovat po celou dobu životnosti satelitu. Pro zjištění pohybu ve všech směrech a osách je nutné plošinu sestavit alespoň ze šesti vzpěr.



Obr. 3 Vybrané pasivní (nahore) a aktivní systémy (dole)

Zhodnocení

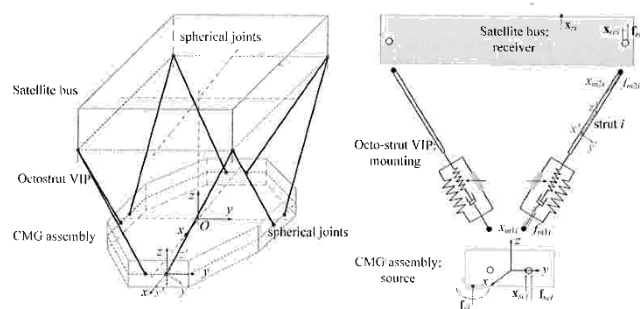
Vibrace během letu kosmického nosiče vznikají z různých důvodů, tím pádem v různé části letu, ale také na odlišných frekvencích. Je tedy velice obtížné jediný pasivní systém naladit tak, aby byl efektivní po celou dobu letu. Maximální redukce vibrací takových systémů bývá zhruba pěti násobná (to znamená, že vibrace nad adaptérem mají zhruba pětinu amplitudy budících vibrací).

Aktivní systémy mají efektivitu zhruba dvojnásobně vyšší oproti pasivním, nicméně limituje je fakt, že do systému energii dodávají, tudíž nejsou příliš vhodné pro hmotné náklady.

Nabízí se tedy využít systém, který by se přizpůsobil aktuálnímu zatížení, ale přesto by vibrace eliminoval pasivně – semi-aktivní systém.

4.1.2 XIUCHANG, H, JINGYA, S, HONGXIGH, H a ZHIYI, Z. Modeling and Optimization of Octostrut Vibration Isolation Platform by FRF-Based Substructuring Method. [10]

Jeden z nejnovějších článků (publikovaný v květnu 2015) zabývající se vibroizolační plošinou pro kosmonautiku. V úvodu je zmíněno několik dřívějších řešení, včetně Porterova tříparametrického tlumiče uvedeného v kap. 4.2.1. Samotný návrh Xiuchanga využívá tříparametrický pasivní izolátor. Pro své simulace jej doplnil paralelně zapojený o aktuátor. Výsledné schéma plošiny je na obrázku ...



Obr. 4 Schéma vibroizolační plošiny

Velká část článku je věnována popisu dynamického modelu založeného na pohybových rovnicích, které byly získány postupným rozkladem složité struktury plošiny a nákladu na menší substruktury. Xiuchang řeší jako jeden z mála náklad jako strukturované těleso, což je pro satelity vhodné, vzhledem k jejich složitosti a nespočtu vlastních frekvencí jednotlivých komponent (antény, solární panely atd.)

Zkoumaná frekvenční odezva pak nemá jediný vrchol jako u simulací, kde je náklad nahrazen jediným tuhým tělesem. Což výrazně zvyšuje složitost simulace, avšak dává přesnější obrázek o tom, zda je daná vibroizolační plošina vhodná či nikoli.

Zhodnocení

Z článku vyplývá, že problematika řešená v disertaci je aktuální téma, a dokonce je na světě možná najít vědecké týmy, které řeší problém podobným přístupem, který je plánován pro disertaci. Nahrazení nákladu jediným pružným tělesem je možné jen při důkladném zdůvodnění, obecně se satelity příliš nepodobají pevnému, homogennímu tělesu, s čímž je v simulacích nutné počítat.

4.2 Vzpěry pro pasivní vibroizolační plošiny pro kosmonautiku

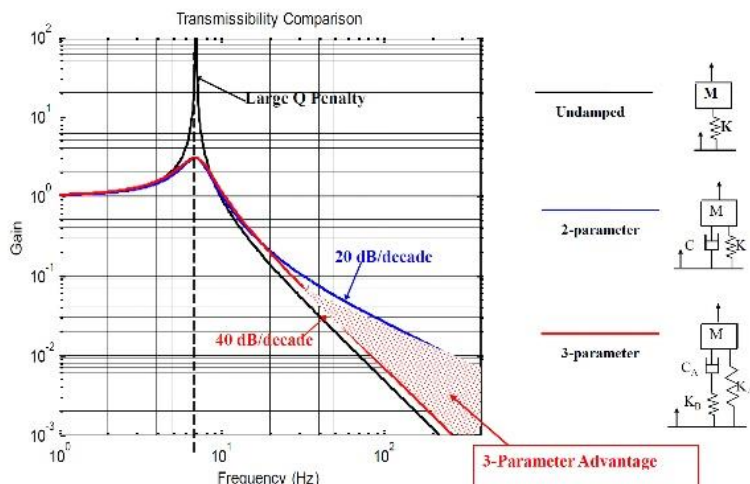
4.2

V předchozí kapitole bylo uvedeno několik aktivních plošin pro eliminaci vibrací, ale také podotknuto, že nejsou vhodné pro hmotné náklady, proto existuje nebo je vyvíjeno několik plošin pasivních. Základem Stewartova mechanismu těchto plošin je vzpěra a o nich pojednává tato kapitola.

4.2.1 PORTER, D. Advanced 1.5 Hz passive viscous isolation system [5]

4.2.1

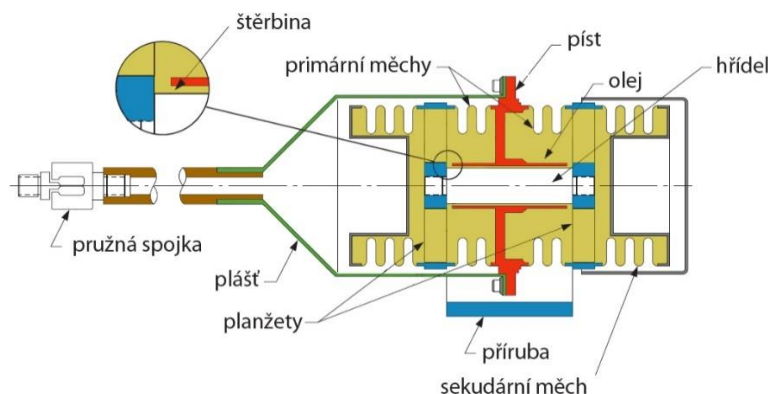
Porter a kol. tímto článkem představuje patentovaný vynález „D-Strut“ který je založen na sériovém spojení pružiny s tlumičem. Z konstrukčního hlediska to znamená umístit tlumicí olej do pružné nádoby, v tomto případě ocelového vlnovce. Toto zapojení má lepší izolační vlastnosti oproti v té době běžně užívanému paralelnímu spojení tlumiče a pružiny viz Obr. 5.



Obr. 5 Výhoda tříparametrického zapojení

Dále je zde uveden matematický model založený na pohybových rovnicích tříparametrického systému pro modelování přenosových charakteristik. Hlavní výhodou tříparametrického zapojení jsou lepší izolační vlastnosti za téměř shodného přenosu v oblasti rezonanční frekvence systému.

Navržený izolátor vychází z předcházejících prototypů, se kterými je navržená konstrukce porovnávána. Porter v článku demonstruje výhody nové konstrukce (zjednodušení konstrukce, úspora váhy a větší izolační efekt pro vysoké frekvence), viz Obr. 6.



Obr. 6 Advanced 1,5 Hz Passive Viscous Isolation System

Při vibracích dochází ke vzájemnému pohybu pláště, viz Obr. 6 a příruby. Tyto dvě součásti jsou spojeny pomocí ocelových vlnoců, které jsou naplněny olejem. Při pohybu příruby vůči plášti dojde k nucenému proudění kapaliny mezi měchy a to přes štěrbinu podél hřídele, tam dojde disipaci energie, tudíž i útlumu celého systému, se kterým je izolátor spojen.

Zhodnocení

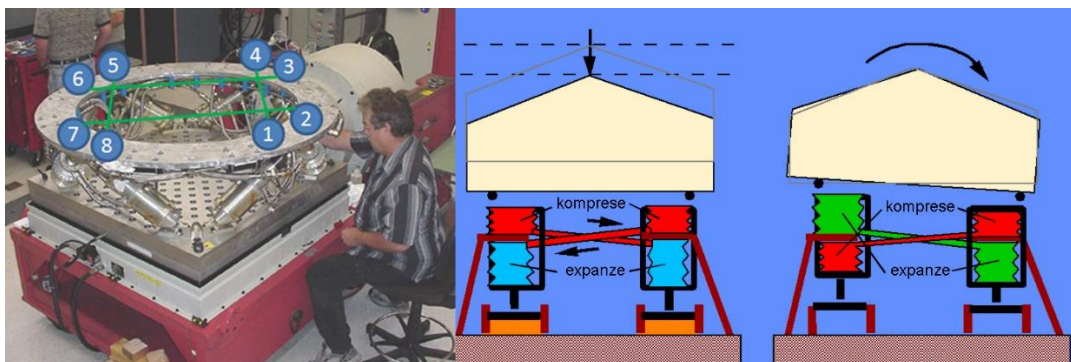
Článek je první, který zmiňuje výhody tříparametrického zapojení a uvádí rovnice pro zjišťování odezvy takto zapojené pružně – tlumicí jednotky. Použití vlnoců navíc řeší případné změny objemu kapaliny vlivem teploty, odpadá tak nutnost zabudování expanzní nádoby do konstrukce. Autor uvažuje s pružinou sériově

spojenou s tlumiče. Na hodnotu její tuhosti má v této konstrukci největší vliv objemová tuhost vlnovce, která lze definovat jako odpor proti stlačení vlnovce naplněného kapalinou. Existuje celá řada aplikací, ve kterých byl koncept s měchy použit, např. MR tlumič zmíněný v kap. 4.2.2. Ani tým výzkumníků okolo Portera v bádání neustal, úlohu hlavního autora převzal Dale T. Ruebsamen který vyvinul systém ELVIS.

4.2.2 D.T. Ruebsamen, Evolved launch vibration isolation system (ELVIS) demonstration unit test results [6]

4.2.2

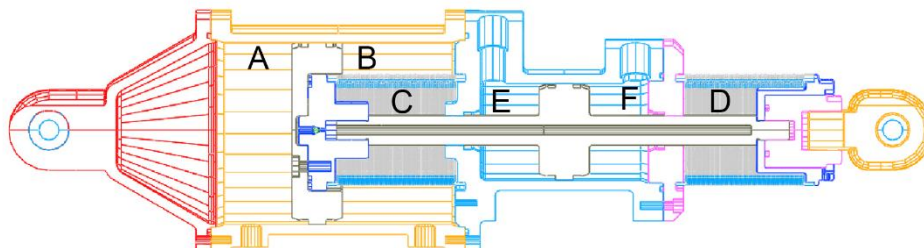
Oproti předcházejícímu návrhu je tento mnohem více ovlivněn aplikací do vibroizolační plošiny. Testy ukázaly, že drobným nedostatkem vibroizolačních plošin je, že jediná součást – vzpěra ovlivňuje vlastní frekvenci plošiny v příčném i podélném směru. Je tedy velice obtížné naladit systém tak, aby vlastnosti o obou na sobě kolmých směrech splňovaly požadavky současně. Proto byl do systému ELVIS zabudován kapalinový stabilizátor nazvaný „cross-link“ viz Obr. 7, který zvyšuje tuhost plošiny v příčném směru, zatímco vlastnosti podélného zůstaly zachovány.



Obr. 7 Cross-link system

Jak už název napovídá, stabilizátor funguje na základě křížného spojení komor ve vzpěrách, viz Obr. 7 vpravo. Při axiálním zatížení dochází v jedné z komor ke kompresi a v druhé k expanzi, tudíž k proudění kapaliny. Při radiálním zatížení dojde v obou komorách ke kompresi, systém má mnohem větší tuhost a pohyb téměř neumožní. Aby systém fungoval v prostoru a zároveň zabránil i rotaci horní kruhové desky kolem své osy, jsou vzpěry spojeny dle zelených čar, viz Obr. 7 vlevo.

Z těchto důvodů došlo k přepracování původního Porterova návrhu a vznikla nová vzpěra viz Obr. 8. Která se skládá z několika komor s různými médii: V komorách A a B je plyn, takže pohybem pístu dochází k jeho stlačování, jedná se tedy o dvoukomorovou pneumatickou pružinu. Vlnovce (komory C a D) jsou naplněny olejem, který mezi nimi proudí díky duté pístnici. Cesta mezi vlnovci vykazuje určité hydraulické ztráty, což vede k disipaci energie a tudíž tlumení. Komory E a F jsou křížně spojeny s příslušnou vzpěrou systému, viz Obr. 8 a slouží jako kapalinový stabilizátor.



Obr. 8 Vzpěra systému ELVIS

Zhodnocení

Systém ELVIS byl sestaven a otestován a výsledky ukázaly v axiálním módu má vlastnosti podobné Porterově oktapedu sestaveného z tříparametrických vzpěr viz kap. Ddd. Ale odezva příčného se výrazně zlepšila, protože stabilizátor odstranil kolébání nákladu, které je nepříjemné především pokud si uvědomíme, že náklady v kosmických nosičích mívají válcový tvar, přičemž jejich výška je větší než průměr.

Pokud by se olej ve vlnovcích nahradil MR kapalinou a do vzpěry byl přidán MR ventil, je možné odezvu ještě vylepšit s využitím semiaktivního řízení, které je výhodné především proto, že vibrace kosmických nosičů jsou v podstatě náhodné a není tedy snadné najít jediné nastavení pasivního systému, který by zajistil dobrý solidní útlum vibrací za každé situace.

4.3 Ocelové vlnovce

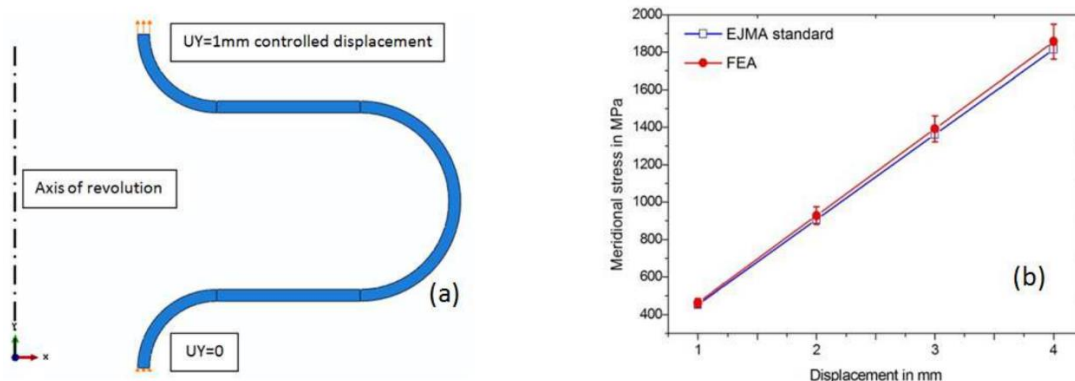
Tyto součásti jsou nejčastěji využívány jako kompenzátory – namáhání osovou silou, jako komponenty spojek – namáhání krutem nebo jako součásti expanzních nádob – namáhání tlakem. U tlumičů by vhodným konstrukčním návrhem mohly zastat funkci hned několika běžně používaných součástí najednou – vodící pásy, těsnění pístnice i plovoucího píst. Tím by došlo k výraznému zjednodušení konstrukce, takže i snížení hmotnosti.

4.3.1 DINESH BABU, P. Analysis of Static Mechanical Behaviour of Metal Bellows Using Finite Element Modeling [2]

Článek pojednává o MKP analýze jednoho konkrétního vlnovce v systému ABAQUS.6.10. Kvůli úspoře výpočetního času byl vytvořen model jediné vlny, navíc jako axisymetrická úloha. I přes toto zjednodušení autor použil 98 000 skořepinových prvků. Pro porovnání byly použity hodnoty deklarované výrobcem vlnovce konkrétního vlnovce (EJMA).

Samotná simulace proběhla tak, že jediná vlna s pevnou vazbou na své spodní hraně viz Obr. 9 byla zatížena posuvem na horní hrany a pozorováno bylo meridiánové napětí v materiálu vlnovce. Výsledné hodnoty poté porovnány se standarty EJMA. Výsledná odchylka modelu nebyla větší než 5%, tím pádem ho lze podle autorů

považovat za verifikovaný a provedli simulace při teplotách 100°C a 400°C, pro které které výrobce vlnovce v normách neuvádí hodnotu napětí při určité stlačení.



Obr. 9 Okrajové podm. a výsledky merid. napětí ve stěně simulovaného vlnovce

Zhodnocení

Článek popisuje simulaci chování vlnovce při různém stlačení a teplotách, což se dá uplatnit například při navrhování parovodů. Výrobce zřejmě neuvádí hodnoty potřebné pro správný konstrukční návrh, proto byl vytvořen mode, verifikován při pokojové teplotě. Poté byly simulace zopakovány pro teploty a tím získány potřebné hodnoty pro optimální dimenzování ocelového vlnovce.

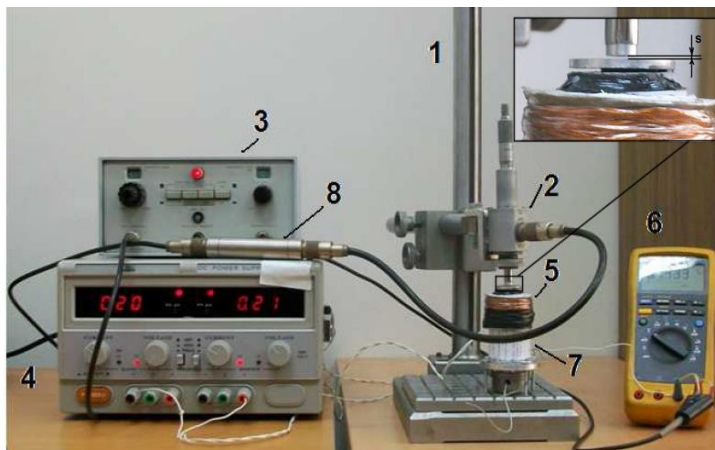
Daný postup lze použít i pro zjištění jiných parametrů vlnovce, které výrobce neuvádí. Pro moji disertaci by takto šlo postupovat při určení odporu proti změně délky při stlačení vlnovce naplněného kapalinou.

4.3.2 Mažeika, J. Research of the flexible bellow with the magnetorheological fluid. [4]

4.3.2

Jeden z mála článků, který popisuje ocelové vlnovce naplněné MR kapalinou. V úvodní části je shrnuto několik empirických vztahů pro určení základních parametrů měchu vzhledem k jeho geometrii - axiální tuhost, maximální pracovní tlak, ale také tečné a obvodové napětí v materiálu.

Nicméně článek neřeší silové poměry ve vlnovci, ale pozornost soustředí na chování MR kapaliny v něm, konkrétně její změnu vlastností v čase. MR kapalina je v ideálním případě suspenze železných částic rovnoměrně rozmístěných v základovém oleji. Jelikož je měch s kapalinou vystaven gravitačnímu poli a hustota železa je vyšší než hustota oleje, částice klesají dolů. Navíc nejsou stejně velké, proto je rychlost klesání různá pro konkrétní částici. Tomuto jevu říkáme sedimentace a zle ji zmírnit volbou vhodných přísad. Z čehož je zřejmé že všechny kapaliny nemohou sedimentovat stejně rychle, už jek kvůli různému obsahu železa. Z tohoto důvodu je dobré sedimentaci měřit. Kromě prosté vizuální kontroly, kde se nachází hranice mezi čistým olejem a suspenzí, lze sedimentaci měřit také o něco více sofistikovanými metodami.

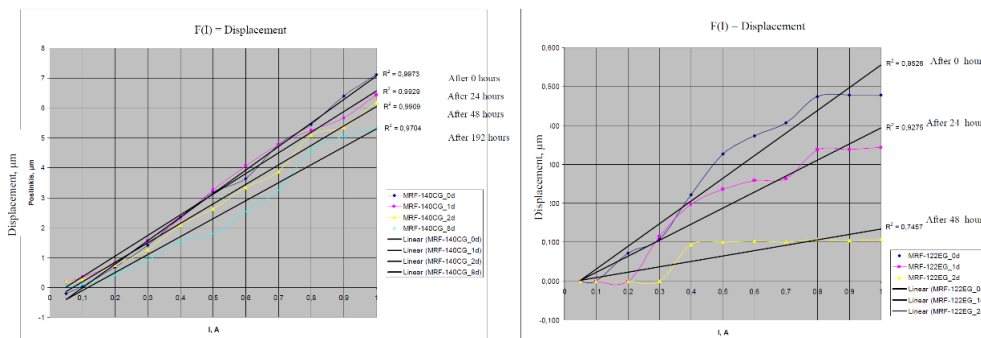


Experimental setup: custom-made adjustable stand, 2. capacitive gap measurement device, 3. reactive impedance converter, 5. induction coil, 6. multimeter, 7. flexible magnetorheological bellow, 8. oscillator

Obr. 10 Měření sedimentace MR kapaliny pomocí deformace ocelového vlnovce

Jednu z nich vymyslel a použil Mažeika. Kolem ocelového vlnovce s MR kapalinou navinul cívku, do které pustil elektrický proud. Vzniklo tedy magnetické pole, které mírně zdeformovalo vlnovec. Deformace byla přímo úměrná počtu železných částic v prostoru cívky, tedy v horní části měchu. Koncentrace částic závisí na typu kapaliny, ale v tomto případě také na čase, protože s vlnovcem se nehýbalo, docházelo k samovolné sedimentaci.

Mažeika provedl měření s rozmíchanou kapalinou MRF – 140CG a poté jej zopakoval po 1, 2 a 8 dnech. Poté vlnovec vymyl, naplnil kapalinou MRF -122 EG a měření zopakoval. Výsledky zanesl do grafu, ze kterých je zřejmé, že k sedimentaci docházelo.



Obr. 11 Deformace vlnovce pro kapalinu MRF 140 vlevo a MRF 122 vpravo

Zhodnocení

Článek je zaměřen především na pozorování změn MR kapaliny v průběhu času. Ocelový vlnovec je použit pouze jako pružný obal. Metoda zmíněná v článku jasně prokazuje, že u kapaliny dochází k sedimentaci, nicméně s její pomocí je poměrně obtížné určit vlastnosti MR kapaliny pro konkrétní využití, např. tlumení. Pro tuto predikci by bylo výhodné změřit útlum konkrétního tlumiče s rozmixovanou kapalinou a totéž měření zopakovat po určité době. Ale k porovnání sedimentace jednotlivých kapalin je dostatečná a průkazná.

4.4 Magnetoreologické tlumiče

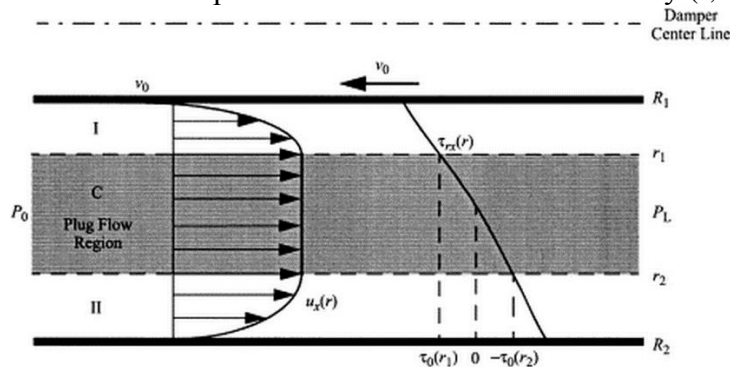
4.4.1 YANG, G. Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. [11]

Jedná se o jeden z nejvíc citovaných článků v oblasti magnetoreologie. Popisuje návrh seismického tlumiče pro zatížení 20 t. V úvodní části je řešen popis MR kapaliny, kde Yang uvádí, že nejpřesněji lze kapalinu popsat pomocí Herschel-Bulkleyho modelu, avšak pro jeho komplikovanost je často nahrazován Binghamským modelem, o kterém tvrdí, že je velice efektivní, především ve fázi návrhu tlumiče.

Model chování kapaliny byl odvozen z Navier-Stokesovy rovnice, v MR štěrbině je možné pozorovat dvě části:

Oblast, kde je **smykové napětí menší než mez toku**. Kapalina má konstantní rychlost v celé oblasti – oblast jádra (C) viz Obr. 12.

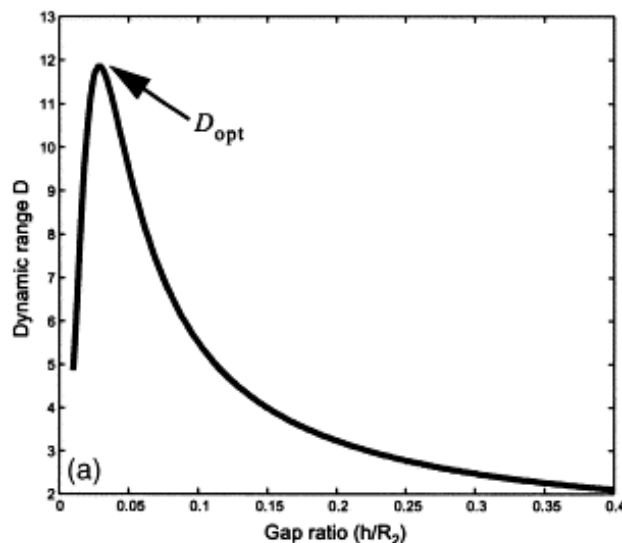
Oblast, kde je **smykové napětí větší než mez toku**. Rychlostní profil je podobný jako pro Newtonskou kapalinu – oblasti v okolí stěn štěrbin (I, II).



Obr. 12 Rychlostní profil MR kapaliny ve štěrbině

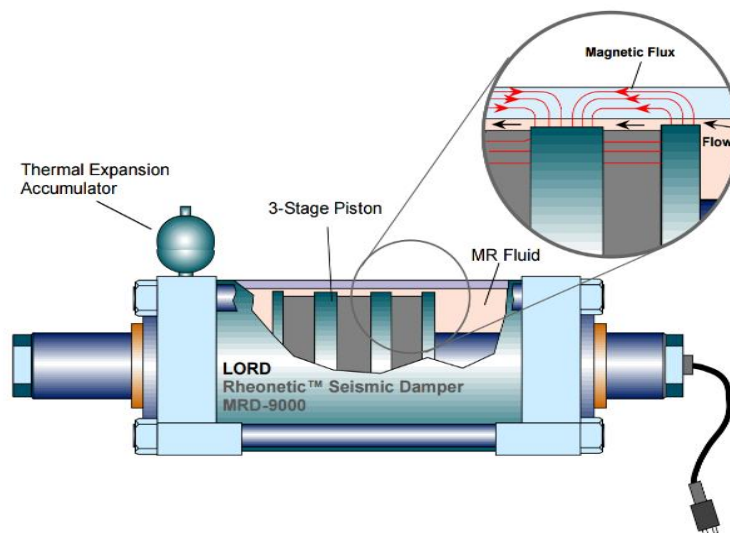
Pro konstrukční návrh a poměrně hrubé odhady tlakových ztrát ve štěrbině je tento model poměrně komplikovaný, proto se často nahrazuje zjednodušeným modelem dvou paralelních desek. Yang uvádí, že odchylka obou modelů je menší než 2% a je závislá na poměru velikosti a středního průměru štěrbin. Nicméně diferenciální rovnice je nahrazena analytickou, což vede k výrazné úspoře výpočetních časů.

Dále je jedna kapitola věnována definici dynamického rozsahu = poměr síly v aktivovaném a neaktivovaném stavu. Pomocí modelu byl dokonce stanoven ideální poměr šířky k střednímu průměru štěrbin vzhledem k maximálnímu dynamického rozsahu, viz Obr. 13. Poměr síly v aktivovaném a neaktivovaném stavu. Pokud chceme tlumič provozovat pouze v adaptivním režimu (konstantní proud pro delší časové úseky) není dynamický rozsah až tak důležitý, ale při semiaktivním řízení tlumiče (skyhook, groundhook aj.) je dynamický rozsah velice důležitý pro efektivitu daného algoritmu.



Obr. 13 Dynamický rozsah v závislosti na geometrie tlumiče

Poté bylo přikročeno k samotnému návrhu tlumiče a experimentálního ověření jeho vlastností. Navržený tlumič má dynamický rozsah 10,29. Takto velký rozsah je dán jednak velkými tlumicími silami, ale také samotnou konstrukcí (píst bez těsnění). Maximální odchylka vlastností získaných experimentálně a simulací byla 2,5%. V závěru je řešena časová odezva, kterou je snaha minimalizovat proudovým regulátorem.



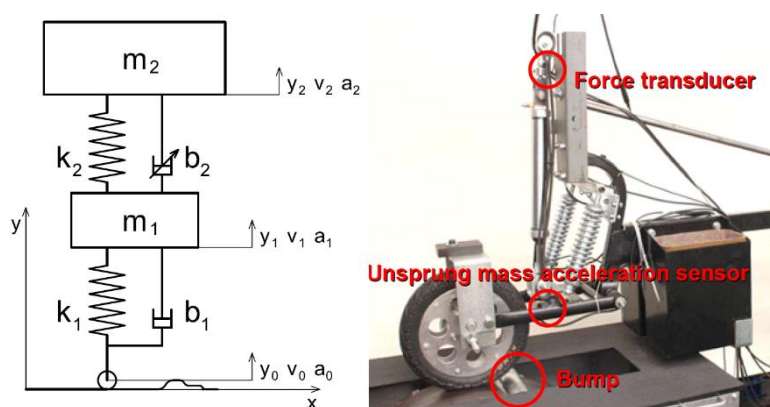
Obr. 14 Navržený tlumič

Zhodnocení

Binghamův model je vhodný pro návrhovou fázi MR tlumiče. Mezikruhovou šterbinu je možné nahradit modelem dvou rovnoběžných desek. Yang dělí tlumicí síly na kontrolované (vlivem proudu) a nekontrolované (tření ucpávek). Dále definoval pojem dynamický rozsah, který je důležité maximalizovat pro regulační efektivnost MR tlumiče.

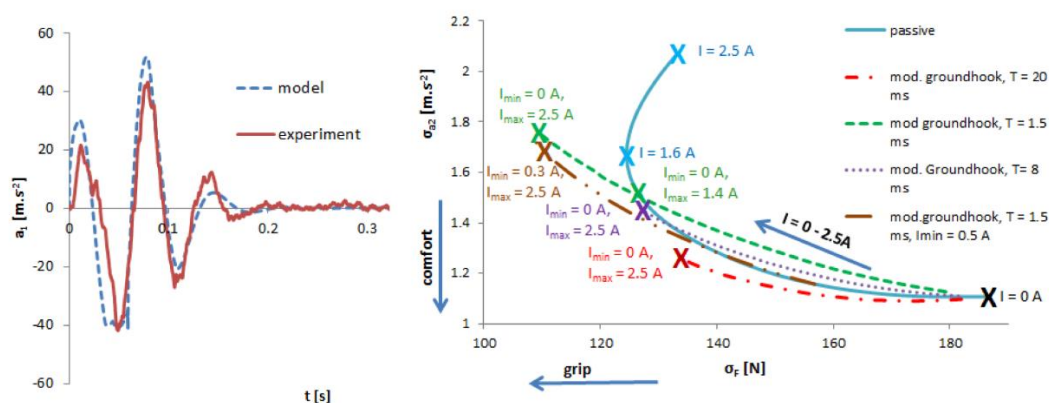
4.4.2 STRECKER, Z. Limiting factors of the response time of the magnetorheological damper [7]

Jako většina článků týkajících se řízení MR tlumiče začíná i tento popisem simulačního modelu. Strecker jej na rozdíl od jiných autorů obohatil o časovou prodlevu, která je nezbytná pro přechod MR kapaliny z neaktivovaného do aktivovaného stavu. Kromě popisu modelu a experimentálního zařízení viz Obr. 15 v kapitole nazvané metody uvedené také princip řídicích algoritmů – skyhook, groundhook, respektive modifikovaný Groundhook, které byly v modelu, ale také při testech použity.



Obr. 15 Schéma dynamického modelu vlevo a experimentální zařízení vpravo

Zanesením časové prodlevy do modelu došlo ke zpřesnění modelu a výsledky se prakticky shodovaly s experimentem, viz Obr. 16 vlevo. Takto verifikovaný model byl využit simulaci vlivu odezvy na kvalitu odpružení, největší vliv byl simulován u algoritmu mod. groundhook. V ideálním případě by při algoritmu groundhook měla být přítlačná síla mezi kolem a vozovkou konstantní, a dynamická složka označena na Obr. 16 jako $\sigma_F = 0$ N. Simulace ukazuje, že při odezvě 20 ms je přínos oproti pasivnímu systému mizivý a čím rychlejší tlumič použijeme, tím přínos roste.



Obr. 16 Srovnání modelu s experimentem vlevo a vliv čas. prodlevy vpravo

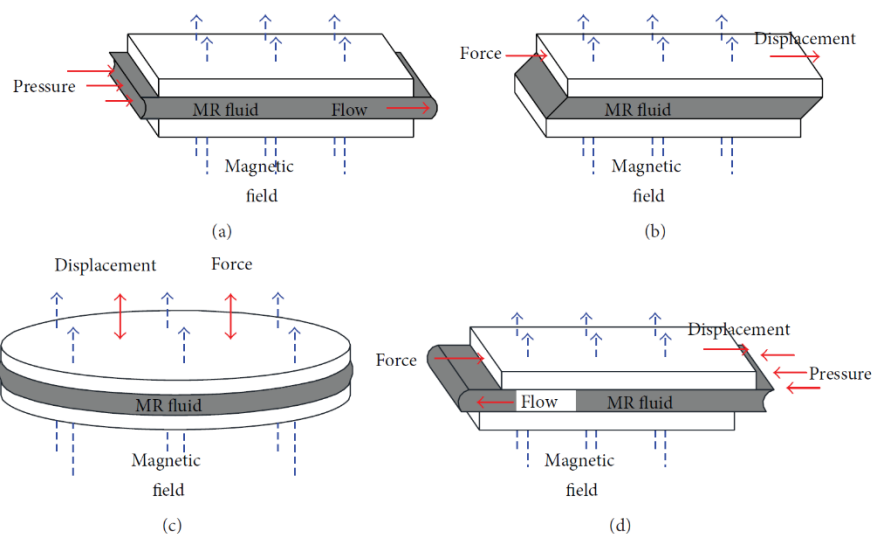
Zhodnocení

Autor poměrně výstižně v poslední větě článku uvádí: „The best possible comfort is achieved with MR damper with short response time.” Pokud chceme tlumič využít

společně se semiaktivním řízením je velmi výhodné při návrhu brát zřetel na jeho odezvu. Ať už výběrem vhodného materiálu, konstrukce magnetického obvodu nebo volbou vhodné řídicí elektroniky.

4.4.3 WANG, Q. A novel Double-Piston Magnetorheological Damper for Space Truss Structures Vibration Suppression [8]

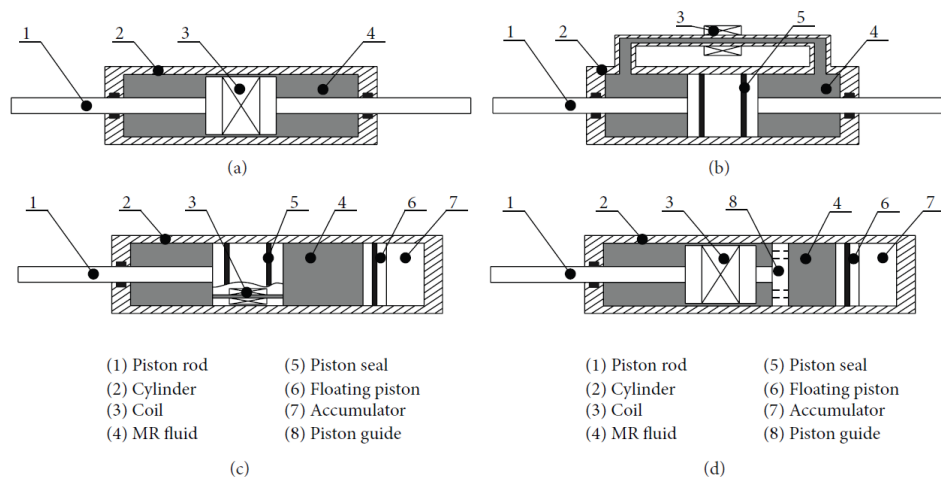
Harbinův institut v Číně publikuje velké množství článků o využití MR technologie pro kosmické aplikace. Tento popisuje konstrukční návrh tlumiče pro příhradové konstrukce satelitu. Autoři se zaměřili na jednoduchost konstrukce, která je inovativní v použití kombinovaného namáhání MR kapaliny. Pro ujasnění jednotlivých módů jsou v článku uvedeny.



Obr. 17 Módy zatížení MR kapaliny

Tlumiče obvykle využívají pro ztráty a tím dosažení potřebného útlumu tlakovými ztrátami při proudění kapaliny šterbinou, jde o namáhání „valve mode“ viz Obr. 17 (a). Druhý mód, který je v článku uveden „shear mode“ (b) je často využíván u spojek, vnitřní síly v kapalině zaručí silový přenos mezi oběma deskami. „Squeeze mode“ (c) pozorujeme při stlačování média mezi deskami, v tomto případě se ve většině případů jedná o magnetoreologický elastomer (MRE) a navržené součásti pracující v tomto módu obvykle slouží jako silentbloky. Módy lze pochopitelně také kombinovat, čehož Wang využil u svého návrhu, který kombinuje „valve a shear mode“ (d) viz Obr. 17.

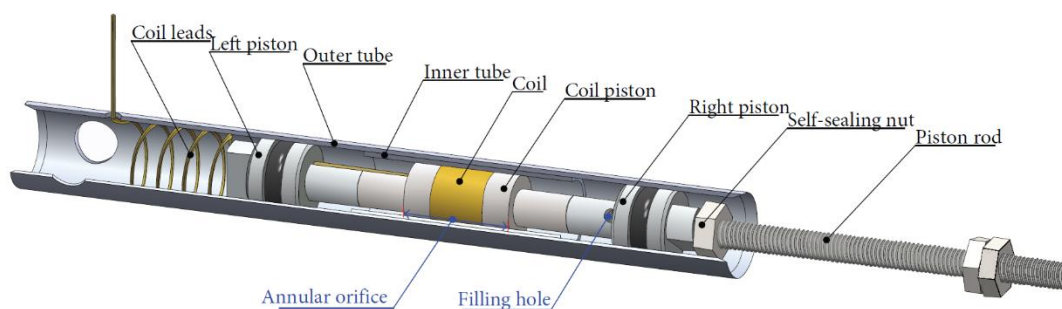
Ve článku jsou také popsány různé konfigurace MR tlumičů, lišící se především polohou MR ventilu, viz Obr. 18. Jak už to v reálném světě bývá, každá z variant má jisté výhody, ale také úskalí. Výběr některé z nich tedy závisí na konkrétní aplikaci. Vzhledem k vnějším rozměrům není příliš výhodné umístit cívku vně tlumiče (b). Pokud je cívka spojena s pístem je zase nutné vyřešit problém s jejím napájením a především těsněním vodičů. Aby bylo zabráněno kavitaci, bývá v těchto systémech jistý přetlak, ke kterému je navíc nutné přičíst pulzaci, tím pádem mohou tlakové špičky kapaliny v tlumiči dosahovat poměrně vysokých hodnot.



Obr. 18 Různé konstrukce MR tlumičů

Další kritérium, podle kterého se tlumiče dají dělit je to, jak je řešena kompenzace objemu při pohybu pístu. Pokud to okolní prostor umožňuje, je nejjednodušší použít pístnici, která prochází přes celou délku tlumiče, pohybem pístu tedy nedochází k objemovým změnám. Varianta (a) viz Obr. 18 má prstencovou MR štěrbinu mezi pístem a válcem, není tedy nutné píst těsnit, čímž dojde ke snížení tření. Stejný princip je zachován také u varianty (d), kde ale pístnice vychází pouze na jedné straně, což nestačí k zaručení rovnoběžného chodu, proto je nutné zhotovit další vedení (poz. 8). Kompenzace objemových změn je řešena pomocí plovoucího pístu (poz. 6). Pomocí něj je kapalina oddělena od vzduchové komory, která zároveň slouží jako pružina.

U nové koncepce navržené Wangem sice vychází pístnice pouze z jedné strany tlumiče, ale přesto není nutné použít plovoucí píst, viz Obr. 19. Dvojice pístu je vzájemně propojena. Tím při pohybu nedochází ke změně objemu. Tok kapaliny a tím i „valve mode“ vyvolává difference objemů jednotlivých komor způsobené pohybem pístu vůči vnitřní trubce. Celkový objem prostoru s MR kapalinou je však neměnný.

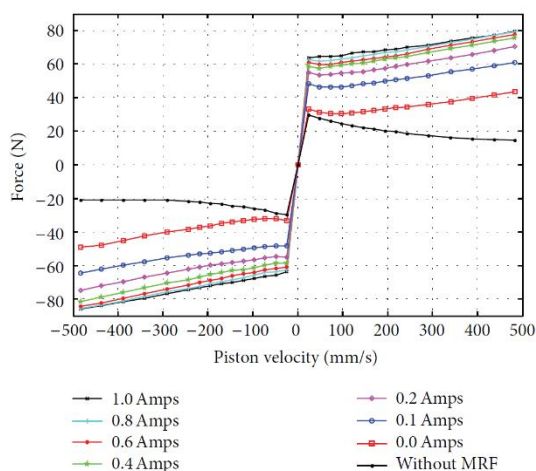


Obr. 19 Dvou-pístový MR tlumič pro kosmické účely

Diference objemů je však poměrně malá vzhledem k rozměrům vnitřní trubky, proto u této koncepce převládá „share mode“.

V další části článku jsou komentována naměřená data, především závislost síly a rychlosti, tedy F-v charakteristika. Ta byla naměřena jednak pro různé proudy v cívce, ale také pro případ, kdy byl tlumič prázdný. Tento experiment byl proveden

pro určení velikosti pasivního tření - vyvolaného především těsněním pístů. Experiment odhalil, že pasivní odpor tlumiče je signifikantní zejména pro malé rychlosti, viz Obr. 20.



Obr. 20 F-v charakteristiky pro různé konfigurace tlumiče

Zhodnocení

Článek popisuje některé ze stávajících koncepcí MR tlumičů a na základě jejich kombinace vytvoření koncepcí nové, která vyniká svou jednoduchostí a vhodností pro příhradové konstrukce. Horší už je to ale s využitím. Dynamický rozsah, který je podle Yanga zásadním parametrem posuzující kvalitu MR tlumičů je u tohoto návrhu velice malý – přibližně 2:1 (poměr mezi silou v aktivovaném a neaktivovaném stavu). Běžné tlumiče mívají rozsah minimálně 5:1 mnohdy i vyšší. [10] Autor tuto skutečnost v závěru hodnotí: „*The ratio between maximum damping at 1.0Amp and minimum damping at 0.0Amp is 2 : 1, which is believed to be sufficient for space applications.*” A nezamýšlí se nad možnými řešeními. Malý rozsah je způsobem především vysokým třením pístního těsnění, vhodné by tedy bylo tento problém minimalizovat.

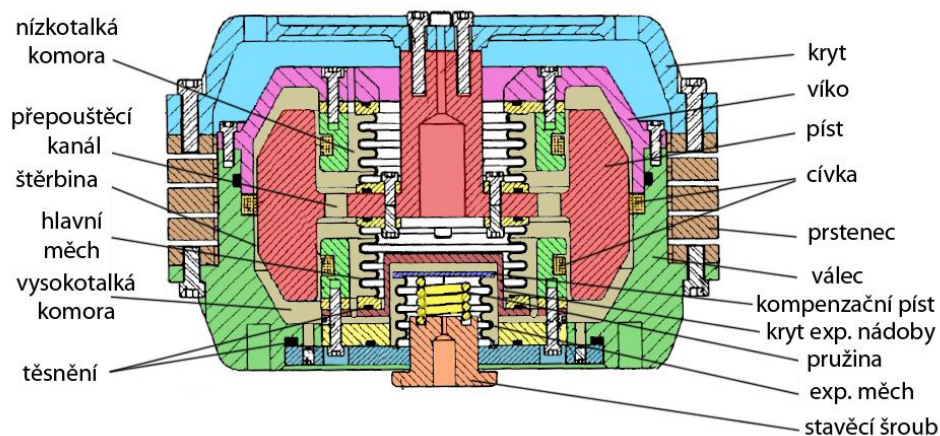
4.4.4 Kelso, J. Magnetorheological Fluid Vibration Isolator [3]

Existuje mnoho dynamických modelů Stewartových plošin s MR tlumiči, které prokazují jejich evidentní přínos – zlepšení přenosu oproti pasivním tlumičům. Ale velmi málo konkrétních konstrukčních řešení vhodných pro aplikaci v kosmu. Jedno z nich bylo patentováno v roce 2005. Jedná se o Tlumič s interním MR ventilem, který pro vedení nevyužívá pístnici jako typy zmíněné Wangem, ale deformaci jednotlivých součástí.

Při pohybu pístu směrem dolů dojde ke kompresi kapaliny ve vysokotlaké komoře a jejímu přesunu do komory nízkotlaké. Kapalina proudí buď přes dvě štěrby opatřené cívkou pro vyvolání MR jevu, nebo pouze přes jednu a přepouštěcí kanál. Obě cesty vykazují velké množství tlakových ztrát, proto zařízení tlumí. Totéž se děje při pohybu pístu směrem vzhůru.

K eliminaci objemových změn kapaliny vlivem teplotních výkyvů je ve spodní části tlumiče umístěn expanzní měch, na který je připevněn kompenzační píst. Tím lze díky stavěcímu šroubu a pružině pohybovat a nastavit tak požadovaný tlak kapaliny.

Jelikož při vibracích jde o poměrně malé zdvihy, jako vedení pístu slouží kryt, jehož horní část je zeslabena a při zátěži dochází k jeho elastické deformaci v axiálním směru. Naopak ve směru radiálním je velice tuhý. Totéž se dá říci o prstenci. Proto lze toto zařízení považovat za jednoosé.



Obr. 21 Magnetorheological Fluid Vibration Isolator

Zhodnocení

Tento tlumič se vymyká běžně uváděným koncepcím, nevyužívá vodící pásky, těsnění má pouze statická, tím pádem se dá předpokládat velmi nízké pasivní tření. Tím pádem možnost dosažení slušného dynamického rozsahu, který je důležitý pro velkou efektivitu semiaktivního řízení, viz kap. 4.4.1.

5 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ KRITICKÉ REŠERŠE

Vibrace během letu kosmického nosiče jsou velmi nebezpečné pro cenný náklad uvnitř. Pro účely eliminace vibrací v kosmonautice bylo v minulosti využito buď pasivních (pro těžší náklady) nebo aktivních systémů (pro lehčí součásti satelitu). Pasivní systémy vynikají svou spolehlivostí a energetickou nenáročností. Aktivní naopak svoji efektivitou, což je vyváženo nutností do systému dodávat nemalé množství energie - aktuátory. [1]

Efektivitu vibroizolačních systémů výrazně ovlivňuje jejich nastavení – tuhost a koeficient tlumení. Pasivní systémy umožňují změnu těchto parametrů pouze v návrhové fázi. Adaptivní – semiaktivní tlumiče je možné regulovat kontinuálně, tím je přizpůsobit aktuálním potřebám a zvýšit tak jejich efektivitu. Jeden z nejprogresivnějších způsobů jak nastavit útlum je využití MR technologie.[8, 14]

I když existuje několik návrhů využívajících MR tlumičů, pro kosmonautiku zatím nebyl využit jediný z nich. Nicméně uplatňují se v jiných oblastech – automobilový průmysl, stavebnictví atd. [8, 9]

Frekvenční spektrum vibrací je při letu kosmického nosiče velmi široké. [1] Běžné MR tlumiče optimálně pracují na nižších kmitočtech, ve kterých se neprojeví jejich časová odezva, tedy na frekvencích cca do 40 Hz [7]. Vibrace o vyšších frekvencích je možné účinně izolovat na základě chování **tříparametrického zapojení** nebo snížením **časové odezvy**, ideálně však kombinací obou těchto možností.

Běžné těsnění tlumiče pomocí pryžových O kroužků přispívá k pasivním odporům (nekontrolovaným tlumícím silám). Což vede k poklesu dynamického rozsahu, tedy zhoršení výsledků při semiaktivním řízení [11].

Jako řešení pro snížení tření a zároveň zlepšení izolačních vlastností pro vysoké frekvence se ukazuje použití **ocelových vlnovců**. Ty se však primárně používají jako kompenzátory, z čehož vyplývá i orientace výzkumu. Existuje sice několik návrhů pasivních tlumičů využívající vlnovce [6, 7, 8], avšak během shrnutí současného stavu poznání jsem nenarazil na zmínku o určení objemové tuhosti – odpor proti stlačení utěsněného vlnovce naplněného kapalinou. Tato vlastnost vlnovce výrazně ovlivňuje chování tlumiče v tříparametrickém zapojení.

Časovou odezvu tlumiče ovlivňuje magnetický obvod, konkrétně jeho materiál a konstrukce. Pro rychlý nejrychlejší tlumič na světě byl využit obvod z elektricky nevodivého feritu [13]. Jeho nevýhodou je v porovnání s ocelí poměrně nízká mez nasycení. Při použití elektricky vodivého materiálu dochází k indukci vířivých proudů a tím k výraznému zpomalení celého systému. Pokud bychom ale zvolili vhodnou strukturu elektricky vodivého materiálu, je možné znemožnit vířivým proudům průchod obvodem a tím odezvu zkrátit. [3, 4, 5] Tuto hypotézu je nutné potvrdit simulacemi i experimentem.

6 PODSTATA A CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním cílem práce je návrh, výroba a testování vibroizolační vzpěry s MR tlumičem. Pasivními odpory, nesmí překročit 10% maximální tlumicí síly a časová odezva musí být menší 2 ms. Přenos vzpěry nesmí překročit hodnotu 1,5 v celém frekvenčním rozsahu 5 - 200 Hz.

Dále je nutné splnit ostatní požadované vlastnosti:

Primární tuhost

$$k_A = 1\,230 \text{ N/mm}$$

Sekundární tuhost

$$k_B = 60\,000 \text{ N/mm}$$

Koeficient tlumení

$$C_A = 26 \text{ Ns/mm}$$

Maximální síla pro dimenzování exponovaných komponent

$$F_{\max} = 38\,000 \text{ N}$$

Dílčí cíle:

Návrh vlnovce

Je nutné vytvořit model simulující zatížení vlnovce, jeho deformaci a napětí uvnitř materiálu. Díky němu bude možné určit rozměry a materiál vlnovce tak, aby zaručil požadované vlastnosti vzpěry.

+ Ověření experimentem.

Návrh magnetického obvodu

Pomocí modelu v prostředí ANSYS Maxwell bude simulováno chování magnetických obvodů. Na základě simulací bude vybrán vhodný materiál a rozměry, případně také struktura magnetického obvodu.

+ Ověření experimentem.

Návrh reologické části

Výpočtem na základě rovnic pro binghamskou kapalinu budou určeny funkční rozměry tlumiče (obtoková tryska, štěrbin).

+Ověření experimentem

7 VĚDECKÁ OTÁZKA A PRACOVNÍ HYPOTÉZA

O kolik decibelů vylepší nově vyvíjený systém přenos vibrací v porovnání s původním - kuželem z kompozitu, na frekvenci 50 Hz?

Pracovní hypotéza

Frekvence 50 Hz je vybrána s ohledem na to, že na ní dochází k nejvýraznějšímu buzení, jedná se o vibrace od spalín motoru. Pokud bude systém naladěný na vlastní frekvenci cca 10 Hz, na 50 Hz se projeví výhoda tříparametrického zapojení. Zároveň pokud bude tlumič dostatečně rychlý, bude možné jej účinně regulovat i při této pro konvenční tlumiče příliš vysoké frekvenci. Kombinací těchto vlastností dojde k výraznému snížení přenosu.

Která ze struktur materiálu magnetického obvodu bude vykazovat nejnižší odezvu?

Pracovní hypotéza

Jedním ze zásadních faktorů ovlivňující odezvu magnetických obvodů je přítomnost vířivých proudů. Pokud obvod nebude z homogenního materiálu, můžeme smyčky vířivých proudů prodloužit a tím časovou odezvu snížit. Těchto principů se využívá např. při konstrukci transformátorů. Jako nejvýhodnější se jeví sestavit obvod s velmi tenkými plechy, jejichž hranice budou kolmé na siločáry.

8 ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ VĚDECKÉ METODY

Pro každý z určených cílů popíši vědecké metody k jeho dosažení. Komplexní problém rozdělím na menší podproblémy, které budu řešit. Nicméně je třeba myslet na to, že jsou vzájemně provázané, proto bude postup iterační.

K návrhu vhodného vlnovce poslouží katalogy výrobců. V těch ale není uváděna objemová tuhost, proto bude nutné vytvořit MKP model, který bude verifikován na základě parametrů v katalogu uváděných a poté určena i objemová tuhost. Model bude také porovnán s experimentem, ve kterém bude měřena deformace, síla a tlak v kapalině uvnitř vlnovce, viz obr. 23.

Jelikož chování materiálů v přítomnosti magnetického pole je nelineární, je vhodné návrh obvodu řešit pomocí MKP modelu. Jako neoptimálnější software se jeví Ansys Maxwell. Pro zkoumání strukturovaných obvodů je nutné navrhnout a vyrobit experimentální zařízení, viz obr. 24, ve kterém bude u vzorků s různými strukturami měřena indukce ve štěrbině obvodů s totožnou geometrií.

Návrh reologické části bude podložen analytickým výpočtem na základě rovnic pro binghamskou kapalinu. Výpočet bude ověřen experimentem, viz obr. 25. Ve kterém dojde díky stlačování hydraulického válce k proudění kapaliny přes otvor o známém průměru (simulující obtokovou trysku). Měřením zdvihu pístu v hydraulickém válci lze určit průtok a měřením tlaku před a za tryskou pak tlakovou ztrátu vyvolanou prouděním kapaliny přes trysku.

10 ODŮVODNĚNÍ NUTNOSTI A POTŘEBNOSTI ŘEŠENÍ DANÉ PROBLEMATIKY

Evropská Vesmírná Agentura (ESA) pro svůj nově vyvíjený nosič ARIANE 6 hodlá nahradit dosud používané vibroizolační adaptéry – pasivní kompozitové kužely systémem, který bude vykazovat větší efektivitu. Samozřejmě za předpokladu, že efektivita převáží předpokládané nevýhody tohoto systému (energetická náročnost a vyšší hmotnost).



Obr. 22 Ariane 6 [20]

Na základě těchto požadavků byla zkoumána možnost použití MR tlumičů, která se na naší fakultě zpracovávala v rámci spolupráce na nedávno ukončeném projektu Semi-Active Damping System – FLPP 3. V případě kladného hodnocení se dá předpokládat další spolupráce v navazujících fázích projektu.

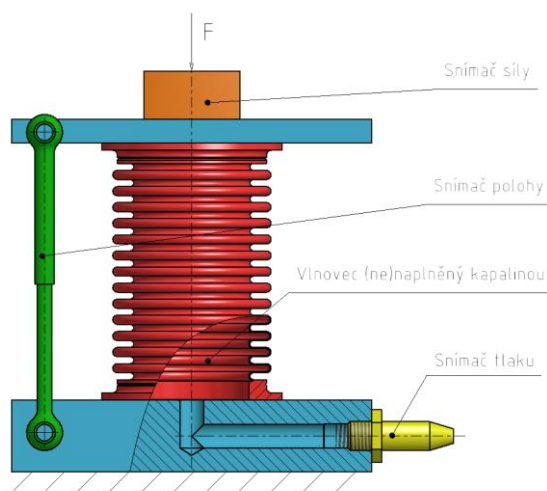
Nicméně výslednou vzpěru bude možné využít i v jiných oborech. Jako palčivý problém se ukazuje přenos vibrací z motorů do rámu letadla a o naše technologie projevil zájem také výrobce automatických praček. Vibrace je tedy snaha snižovat obecně a vývoj systému, který zvýší efektivitu jejich eliminace, ale přesto bude stále využívat pasivních tlumicích principů, se může uplatnit na velmi širokém poli.

11 POPIS NAVRHOVANÝCH KONCEPČNÍCH A METODICKÝCH POSTUPŮ

Po sepsání kritické rešerše budou vytvořeny dílčí modely a provedeny validační experimenty na zařízeních s následujícími schémata.

Měření axiální a objemové tuhosti vlnovce:

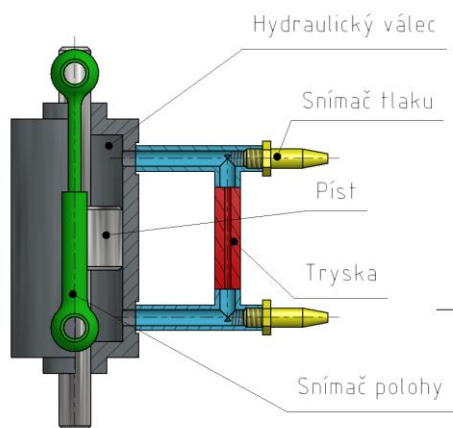
Při zatížení silou dojde k deformaci vlnovce, a to jak prázdného, tak naplněného kapalinou. Měřena bude síla, vzájemná poloha horní a spodní desky, ale také tlak v kapalině.



Obr. 23 Měření axiální a objemové tuhosti vlnovce

Měření tlakové ztráty při proudění kapaliny tryskou:

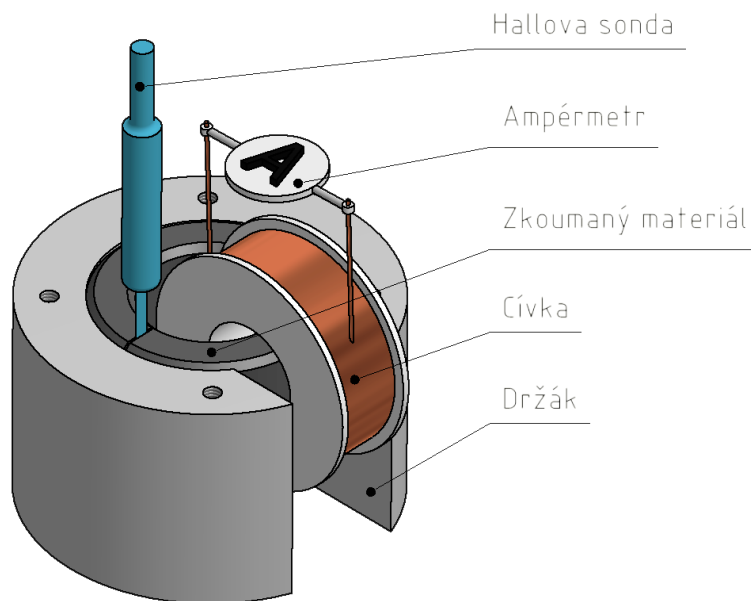
Pohyb pístu v hydraulickém válci vyvolá proudění kapaliny přes trysku, tím dojde k tlakové ztrátě. Ta bude určena rozdílem hodnot tlaku určených snímačem před a za tryskou. Pro určení průtoku bude měřen zdvih pístu.



Obr. 24 Měření hydraulických ztrát při proudění kapaliny tryskou

Měření transientního chování magnetického obvodu:

Pro výběr nejvhodnějšího materiálu, případně struktury, bude vytvořeno několik vzorků stejných rozměrů, které budou umístěny v experimentální zařízení, viz obr. 25. Měřena bude magnetická indukce ve štěrbině magnetického obvodu, kterou bude možné naplnit kapalinou. Kromě samotných hodnot max. v závislosti na proudu v cívce je také neméně důležitá doba, za kterou dojde k vybuzení 66% maximální indukce.



Obr. 25 Měření indukce se štěrbině magnetického obvodu

Po ověření správnosti dílčích modelů bude přikročeno k samotnému návrhu vzpěry. Na základě dat z měření budou modely korigovány a poté navržena konkrétní geometrie všech komponent vzpěry. Nejvíce exponované díly budou dimenzovány s ohledem na zvyklosti při návrhu v kosmonautice [16] a zkontrolovány pomocí pevnostní analýzy v prostředí ANSYS.

12 SPOLUPRÁCE S INSTITUCEMI

Uskutečněné:

Honeywell (HS13457187)

FEKT (SVJ – Kubík)



Připravované:

ESA

HONEYWELL

(HS)

FEKT

(SVJ)

UNIVERSITE DE NICE SOPHIA ANTIPOLIS

(TWINING)

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

(TWINING)



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**



esa

European Space Agency



Université
Nice SOPHIA ANTIPOLIS

13 PŘEDPOKLÁDANÉ NÁKLADY SPOJENÉ S ŘEŠENÍM

Položka	Částka	Zdroj
Osobní náklady	380 000 Kč	HS13457187
Nákup vlnovců pro experimenty	80 000 Kč	HS
Výroba testovacího standu pro ověření magnetických vlastností	12 000 Kč	SVJ - Kubík
Výroba vzorků pro ověření magnetických vlastností	35 000 Kč	SVJ
Výroba experimentálního zařízení pro ověřování vibroizolačních vlastností	25 000 Kč	HS
Výroba vrypů pro testování	50 000 Kč	HS

14 CHARAKTERISTIKA PŘEDPOKLÁDANÉHO VÝSLEDKU **14**

V rámci řešení práce vzniknou tři články, z nichž alespoň jeden v impaktovaném časopise.

Patent semi-aktivní vibroizolační vzpěry s minimálními pasivními odpory a velmi krátkou dobou odezvy. Inspirován zjednodušenou verzí pro testování.

Kromě těchto výsledků uznávaných Metodikou vědy a Výzkumu také několik funkčních vzorků (experimentální zařízení, vzpěra)

Seznam potencionálních periodik:

Materials and Design	IF 3.51
Smart materials and structures	IF 2.45
Mechatronics	IF 1.82
Acta Mechanica Journal	IF 1.47
International Journal of Smart and Nanomaterials	IF 1.31
Journal of Vibroengineering	IF 0.66

15 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] CARUNTU, Dumitru I. a Christopher SHOVE. Overview of payload vibration isolation systems. *Proceedings of the ASME Design Engineering Division*. New York: [s.n.], 2005, (Pts A and B).
- [2] DINESH BABU, P., S. KEERTHI PRASATH, M. BARANI DHARAN, C. VENKAT RAMAN, R. NARAYANAN a K.C. GANESH. Analysis of Static Mechanical Behaviour of Metal Bellows Using Finite Element Modeling. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, (vol 3): 996-1000. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.996. ISSN 1662-7482.
- [3] DOWELL, P. Effects Of Eddy Currents In Transformer Windings. *Proceedings Of The Institution Of Electrical Engineers-London*. 1966, Volume: 113 Issue: 8
- [4] GUAN, Xinchun, Pengfei GUO, Jinping OU, Jinsong LENG, Anand K. ASUNDI a Wolfgang ECKE. Study of response time of MR damper. *SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART MATERIALS AND NANOTECHNOLOGY IN ENGINEERING*. 2014, (Pages: 287-291): 74930U-74930U-9. DOI: 10.1117/12.840217.
- [5] CHUNLING, Sun a Ruijing ZHANG. Analysis of Eddy Current Loss of Magnetorheological Damper. *INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL, CONTROL AND AUTOMATION (ICECA 2014)*. 2014, (Pages: 287-291).
- [6] KELSO, J. a E. LINDER. *Magnetorheological Fluid Vibration Isolator*.
- [7] MAZEIKA, D, J KUNEVICIUS, V VOLKOVAS a E DRAGASIUS. Research of the flexible bellow with the magnetorheological fluid. *JOURNAL OF VIBROENGINEERING*. 2010, (Volume: 12 Issue: 4).
- [8] PARK, Bong Jun, Fei Fei FANG a Hyoung Jin CHOI. Magnetorheology: materials and application. *Soft Matter*. 2010, **6**(21): 5246-. DOI: 10.1039/c0sm00014k. ISSN 1744-683x.
- [9] PAVIC, A., T. ARMITAGE, P. REYNOLDS a J. WRIGHT. Methodology for modal testing of the Millennium Bridge, London. *PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS-STRUCTURES AND BUILDINGS*. 2002, (Volume: 152 Issue: 2 Pages: 111-121). ISSN 0965-0911.
- [10] PORTER, Davis, Dave CUNNINGHAM a John HARRLER. Advanced 1.5 Hz Passive Viscous Isolation System. In: *Adaptive Structures Forum*. Reston, Virigina: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1994, -. DOI: 10.2514/MASF94.

-
- [11] RUEBSAMEN, Dale T. Evolved launch vibration isolation system (ELVIS) demonstration unit test results. In: *Proc. of the 2003 S/C and L/V dynamics Environments Workshop, The Aerospace Corporation*. El Segundo: California, 2003.
- [12] STRECKER, Z, J ROUPEC, I MAZŮREK a M KLAPKA. Limiting factors of the response time of the magnetorheological damper. *International journal of applied electromagnetics and mechanics*. Washington: IOS Press, 2015, (vol. 47 2). ISSN 1383-5416.
- [13] STRECKER, Z., J. ROUPEC, I. MAZUREK, O. MACHACEK, M. KUBIK a M. KLAPKA. Design of magnetorheological damper with short time response. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. : -. DOI: 10.1177/1045389X15591381. ISSN 1045-389x.
- [14] UNSAL, Memet. Semi-active vibration control of a parallel platform mechanism using magnetorheological damping. Florida, 2006. Disertační práce. University of Florida.
- [15] WANG, Qiang, Mehdi AHMADIAN a Zhaobo CHEN. A Novel Double-Piston Magnetorheological Damper for Space Truss Structures Vibration Suppression. *Shock and Vibration*. 2014, (vol 2014): 1-11. DOI: 10.1155/2014/864765. ISSN 1070-9622.
- [16] WIJKER, Jaap J. *Spacecraft structures*. Berlin: Springer, c2008, 504 p. ISBN 35-407-5553-5.
- [17] XIUCHANG, Sun JINGYA, HONGXING a ZHIYI. Modeling and Optimization of Octostrut Vibration Isolation Platform by FRF-Based Substructuring Method. *Journal of aerospace engineering*. New York, N.Y.: American Society of Civil Engineers, Aerospace Division, 2015, (vol 28, 3). ISSN 0893-1321.
- [18] YANG, G. B.F. SPENCER, J.D. CARLSON a M.K. SAIN. Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. *Engineering Structures*. 2002, vol. 24(3): 309-323. DOI: 10.1016/S0141-0296(01)00097-9. ISSN 01410296.
- [19] Ariane 5 - Industrial team. *Airanespace* [online]. ©2015 [cit. 2015-07-08]. Dostupné z: <http://www.arianespace.com/launch-services-ariane5/industrial-team.asp>
- [20] Ariane 6 Go Ahead Decided. *Deep Resources* [online]. 2015 [cit. 2015-08-17]. Dostupné z: <https://deepresource.wordpress.com/2015/06/17/ariane-6-go-ahead-decided/>

16 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Kosmický nosič Ariane 5 (ESA) [12].....	4
Obr. 2	Záznam zrychlení v podélném směru při letu nosiče Taurus	5
Obr. 3	Vybrané pasivní (nahore) a aktivní systémy (dole)	6
Obr. 4	Schéma vibroizolační plošiny	7
Obr. 5	Výhoda tříparametrického zapojení.....	8
Obr. 6	Advanced 1,5 Hz Passive Viscous Isolation System.....	8
Obr. 7	Cross-link system.....	9
Obr. 8	Vzpěra systému ELVIS	10
Obr. 9	Okrajové podm. a výsledky merid. napětí ve stěně simulovaného vlnovce..	11
Obr. 10	Měření sedimentace MR kapaliny pomocí deformace ocelového vlnovce	12
Obr. 11	Deformace vlnovce pro kapalinu MRF 140 vlevo a MRF 122 vpravo	12
Obr. 12	Rychlostní profil MR kapaliny ve štěrbině.....	13
Obr. 13	Dynamický rozsah v závislosti na geometrie tlumiče	14
Obr. 14	Navržený tlumič.....	14
Obr. 15	Schéma dynamického modelu vlevo a experimentální zařízení vpravo.....	15
Obr. 16	Srovnání modelu s experimentem vlevo a vliv čas. prodlevy vpravo	15
Obr. 17	Módy zatížení MR kapaliny	16
Obr. 18	Různé konstrukce MR tlumičů	17
Obr. 19	Dvou-pístový MR tlumič pro kosmické účely.....	17
Obr. 20	F-v charakteristiky pro různé konfigurace tlumiče.....	18
Obr. 21	Magnetorheological Fluid Vibration Isolator	19
Obr. 22	Ariane 6 [20].....	25
Obr. 23	Měření axiální a objemové tuhosti vlnovce.....	26
Obr. 24	Měření hydraulických ztrát při proudění kapaliny tryskou	26
Obr. 25	Měření indukce se štěrbině magnetického obvodu.....	27