



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

MĚŘENÍ DÉLKOVÉ A OBJEMOVÉ TUHOSTI OCELOVÝCH VLNOVCŮ

Measurement of the length and volume stiffness of steel bellows

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MICHAL VALÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. IVAN MAZŮREK, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Michal Valík

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Měření délkové a objemové tuhosti ocelových vlnovců

v anglickém jazyce:

Measurement of the length and volume stiffness of steel bellows

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je optimalizovat metodiku pro měření délkové a objemové tuhosti vlnovců z nerezové oceli. Vlnovce tvoří významný komponent pružící a tlumící jednotky pro odpružení satelitu v kosmickém nosiči.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Materiál a metody
5. Výsledky
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, výkres sestavení, fotografická dokumentace, laboratorní protokol, digitální data

Typ práce: experimentální; Účel práce: výzkum a vývoj

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Zásady pro vypracování práce:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2014.pdf

Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam odborné literatury:

- Přikryl T. Ariane 6 se představuje, In: Letectví + kosmonautika, 8/2012, str. 46
Ruebsamen, D. T., Boyd, J., Vecera, J., Nagel, R. DEVELOPMENT OF A DUAL MODE D-STRUT VIBRATION ISOLATOR FOR A LASER COMMUNICATION TERMINAL, In: Proceedings of the 38th Aerospace Mechanisms Symposium, Langley Research Center, 2006
Hindle, T. Design Study for Small Design Satellite SoftrideSoftride®Launch Vibration Isolation SystemVibration System, In: The 2005 Small Payload Ride Share ConferenceThe Conference, Lockheed Martin, Denver Colorado, 2005
Johnson, C. D., Wilke, P. S. PROTECTING SATELLITES FROM THE DYNAMICS OF THE LAUNCH ENVIRONMENT, CSA Engineering, Inc., In: American Institute of Aeronautics and Astronautics, CA, 2001

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 22.11.2013



v.z. Hartl

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Ředitel ústavu

M. Doupovec

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá experimentálním měřením délkové a objemové tuhosti vlnovce. První část je věnována rozboru využití vlnovce se spojenou problematikou. Dále se zmíněná kapitola věnuje dosavadnímu poznání znalostí tuhostních charakteristik kovových měchů. Ve druhé části jsou popsány zvolené metody a postupy měření. Poslední část práce se zabývá vyhodnocením a rozбором naměřených dat k získání výsledných hodnot délkové a objemové tuhosti měřeného vlnovce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vlnovec, délková tuhost, objemová tuhost, tlumič, vibroizolační systém

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the experimental measurement of the length and volumetric stiffness of steel bellows. The first part is dedicated to the analysis of the utilisation of metal bellows connected to the mentioned theme. This part also deals with the actual knowledge of metal bellow's stiffness characteristics. The second part contains descriptions of selected methods of the measurement process. The last part of this work focuses on the evaluation and analysis of measured data in order to gain the results of the length and volumetric stiffness of metal bellows.

KEY WORDS

Metall bellow, length stiffness, volumetric stiffness, strut, isolation system

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VALÍK, Michal. *Měření délkové a objemové tuhosti ocelových vlnovců*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Ivan Mazurek, CSc.

PODĚKOVÁNÍ

Za velkou podporu bych rád poděkoval své přítelkyni a rodině. Dále bych rád poděkoval všem lidem, kteří mě podporovali ve tvorbě této práce a poskytli mi cenné rady, informace a materiály. Zvláště panu doc. Ing. Ivanu Mazůrkovi, CSc. za trpělivost, a pod jehož vedením jsem došel k potřebným výsledkům.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Měření délkové a objemové tuhosti ocelových vlnoců* vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Ivana Mazůrka, CSc. V seznamu zdrojů jsem uvedl veškerou použitou literaturu a odborné zdroje.

V Brně, dne 30. května 2014

.....
Valík Michal

OBSAH

1 ÚVOD	13
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1 Nosné rakety a jejich historie	14
2.2 Vibroizolační systémy	15
2.2.1 D-Strut	16
2.3 Vlnovec	18
2.3.1 Způsoby zatížení vlnovců	19
2.4 Tuhost vlnovce	20
2.4.1 Stanovení délkové tuhosti pomocí metody konečných prvků	21
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	23
4 MATERIÁL A METODY	24
4.1 Volba vlnovce	24
4.1.1 Naměřené parametry vlnovce	24
4.2 Zavíčkování vlnovce	25
4.3 Použitá měřidla a zařízení	25
4.4 Příprava a postup měření	25
4.5 Analýza chování tlumiče se skutečnými a naměřenými tuhostmi vlnovce	27
5 VÝSLEDKY	28
5.1 Vyhodnocení naměřených dat	28
5.1.1 Separace a vytřídění lineárních dat	29
5.1.2 Směrnice vyhodnocených přímk	30
5.2 Délková a objemová tuhost vlnovce	31
5.3 Teoretický model tlumiče s reálnými a naměřenými hodnotami	32
5.3.1 Chování tlumící soustavy se skutečnými a naměřenými tuhostmi	32
5.4 Výpočet vlnovce metodou konečných prvků	34
6 DISKUZE	35
7 ZÁVĚR	37
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	38
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	40
10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	41
11 SEZNAM TABULEK	42
12 SEZNAM SAMOSTATNÝCH PŘÍLOH	43

Kosmická zařízení, jako jsou umělé družice Země neboli satelity, patří v současnosti k nezbytným objektům pohybujících se ve vesmíru. Jejich činnost na oběžné dráze je nepostradatelná především v oblasti předpovědi počasí, telekomunikace, monitorování Země apod. S využitím těchto technických zařízení je však spojena řada problémů, které jsou u jiných přístrojů zanedbatelné. Především se jedná o samotnou dopravu satelitu na místo určení. Během přepravy zařízení může dojít k poškození optických, elektronických či jiných velmi drahých částí vlivem nadměrných otřesů a dynamického zatížení. Během cesty zařízení podléhá zatížení a vibracím všech frekvencí způsobených např. spuštěním motorů, startem rakety, odhozením palivových nádrží aj. Jako ochrana drahých satelitů proti nežádoucím vlivům slouží konkrétní řešení celkového vibroizolačního systému, který pracuje v oblasti mezi kosmickým nosičem a satelitem. Doposud bylo použito několik provedení tlumících soustav určených ke zmírnění kmitů a vibrací. Cílem je vlastnosti těchto systémů ještě zdokonalit nebo objevit nová konstrukční provedení. Z důvodu hermetičnosti tlumičů je potřeba v kosmonautice využít speciálních řešení jejich konstrukce. Mezi adekvátní prvky tlumiče splňující náročné požadavky v kosmonautice patří vlnovec. Tento kovový měch se v současných vesmírných tlumících systémech využívá ke vhodné kombinaci jeho tuhostních vlastností vlivem změny zaplnění vnitřního prostoru vlnovce tlumící kapalinou. Změnou vnitřního zaplnění kovového měchu dochází ke změně tuhosti celého vibroizolačního systému, a tím ke schopnosti odolávat silovým zatížením během letu vesmírné rakety. V této bakalářské práci jsou pomocí experimentu získána a vyhodnocena data k určení hodnot délkové a objemové tuhosti vlnovce, které nezbytně patří k potřebným charakteristikám při dimenzování a návrhu vibroizolačního systému využívající ve své konstrukci právě kovový měch.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Nosné rakety a jejich historie

Nosná raketa neboli kosmický nosič je dopravní prostředek, který je poháněn raketovými motory a je určen k vynesení potřebného nákladu (satelitu, sondy, družice, apod.) na oběžnou dráhu Země nebo do vesmíru. Nosná raketa představuje dopravní prostředek, který je určen většinou pro jedno použití a jen výjimečně jsou některé její části použity vícekrát [1].

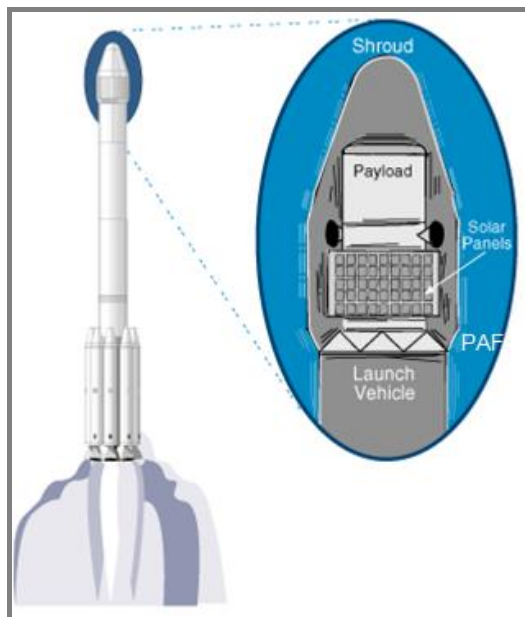


Obr. 1 Start rakety Ares 5 [2]

V minulosti se používala jednostupňová konstrukce nosiče, ale v současnosti jsou běžné vícestupňové rakety, které umožňují dosáhnout vyšší rychlosti. Vícestupňová raketa se skládá z jednotlivých částí vybavených motorem a palivem, které se během letu postupně oddělují. Části (stupně) mohou být uloženy nad sebou nebo vedle sebe. Většina kosmických nosičů v druhé polovině padesátých let 20. století byla vyvinuta z vojenských mezikontinentálních raket. Výjimkou byla americká nosná raketa Vanguard. Ta byla vyvíjena přímo za účelem vynesení vědeckých družic do vesmíru v letech 1957 – 1958. Právě v 60. letech byly nosiče již konstruovány za účelem dopravení užitečného nákladu do kosmu, přestože často byly tyto projekty financovány z prostředků určených pro armádu. Od 80. let v tomto odvětví začaly pronikat také komerční organizace v souvislosti se zvyšujícím se počtem vypouštění stacionárních telekomunikačních družic. V současnosti těmito dopravními prostředky disponuje desítky zemí v čele s USA či Ruskem. Často tyto země spolupracují s některou z nadnárodních organizací, které nosné prostředky vyvíjejí [1]. V posledních 30. letech vznikly desítky nosných raket, které se jednotlivě podílely na konkrétních projektech.[3]

2.2 Vibroizolační systémy

Při stoupání na oběžnou dráhu podstupují všechny rakety vlivy událostí, jako jsou zažehnutí motorů, oddělování jednotlivých stupňů rakety, hoření motorů, atd. To vše způsobuje vznik dynamického zatěžování. Ke zmírnění těchto negativních působení slouží vibroizolační systémy, které chrání užitečný náklad před otřesy a rázy z nosné rakety. Cílem je, aby se užitečný náklad dostal na oběžnou dráhu Země bez úhony.



Obr. 2 Schéma umístění nákladu a tlumícího systému [4]

Vibroizolační systém pracuje v místě připojení mezi izolovanou konstrukcí (náklad) a pevnou základnou (raketový nosič) pomocí tzv. payload adapter fitting [6]. V podstatě se jedná o sestavení dvou desek, mezi kterými jsou pod různými úhly umístěny tlumiče [3]. Tlumená soustava - kosmická loď, náklad - je velmi bohatá na dynamické jevy o různých frekvencích, času zatížení a právě s tímto ohledem musí být konstrukce vibroizolačního systému dimenzována. Náklad na palubě omezuje konkrétní konstrukci tlumení svou hmotností, objemem a působící silou [5]. Nejnebezpečnější frekvence rázového zatížení se pohybují kolem 1000Hz a více. Tlumící vibrační systém kosmické lodi je ve většině případů navržen ke zmírnění vibrací o frekvenci přibližně 12Hz a výše, na druhou stranu je schopen izolovat rázová zatížení o frekvenci větší jak 70Hz. Zbylý rozsah 100 – 1000 Hz může být ovšem také eventuálním zdrojem problémů [6].

Dimenzování tlumících systémů probíhá tímto způsobem:

- Návrh předběžného izolačního systému, na kterém se nasimuluje nejhorší možné zatížení, díky němuž se získají hodnoty požadavků kladené na jednotlivé komponenty.
- Výpočet maximálního zatížení, pevnost konstrukce, rozměrů, aby odpovídaly požadované tuhosti.
- Sestrojení konečného zařízení, které splňuje parametry předchozího modelu a následné ověření výkonu tlumícího systému [7].

2.2.1 D-Strut

D-strut firmy Honeywell je vzpěra se dvěma pružinami a tlumičem, který zajišťuje lineární tlumení. Takový typ vzpěr se používá k útlumu rázů při startu nosiče a k tlumení malých vibrací na oběžné dráze [8]. V jeho konstrukci je uložena pružina, např. u systému ELVIS se jedná o pneumatickou pružinu [9]. Tlumící síla je vyvolána prouděním kapaliny mezi dvěma komorami tvořenými dvěma vlnovci přes škrtkovací ventil [8]. D-Strut bývá součástí vibroizolačního systému ELVIS (Evolved Launch Vibration Isolation System). Ten umožňuje tlumení v axiálním a laterálním směru. ELVIS je sestaven ze dvou desek, mezi kterými je pod různými úhly umístěno několik dvojic zmíněných vzpěr D-Strut. Velikost systému je závislá na velikosti nákladu [8].

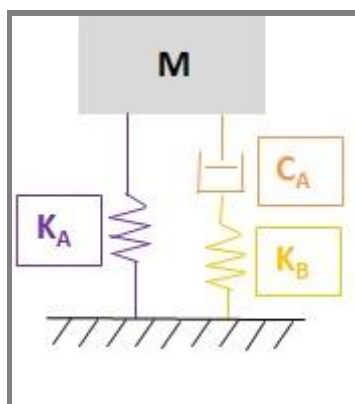


Obr. 3 D-strut od firmy Honeywell [3]

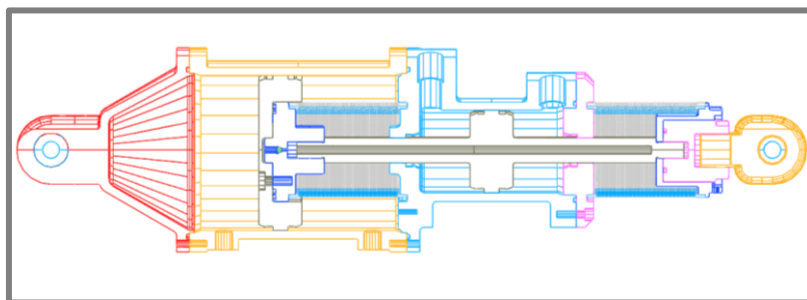


Obr. 4 Vibroizolační systém ELVIS od firmy Honeywell [3]

Při práci vzpěry D-strut zejména při nižších frekvencích zatěžování, tj. do 10 Hz, systém funguje jako soustava paralelně zapojené pružiny o tuhosti K_A a tlumiče. Při vyšších frekvencích zatěžování dochází vlivem rychlosti proudící tlumící kapaliny k velkému odporu v místě ventilu, což brání tlumící kapalině při proudění do druhého vlnovce. Vlivem bránění tlumící kapaliny proudit do druhého vlnovce se se projevuje objemová tuhost K_B . V těchto vysokých frekvencích se tím eliminuje negativní vliv tlumiče na přenos vibrací mezi základnou a nákladovou hmotou. Při vysokých frekvencích je tedy výsledná hodnota tuhosti dána součtem $K_A + K_B$. Na základě vztahů uváděných firmou Honeywell plyne, že vzpěra D-Strut ideálně pracuje při konkrétním poměru tuhostí K_B a K_A . Tento podíl je závislý na velikosti nákladu a jednotlivých tuhostech pneumatické pružiny a vlnovce. U ocelového měchu je možno jeho tuhost ovlivnit vhodnou volbou geometrických parametrů, jako jsou tloušťka plechu, přesah vlny, aj. [9].

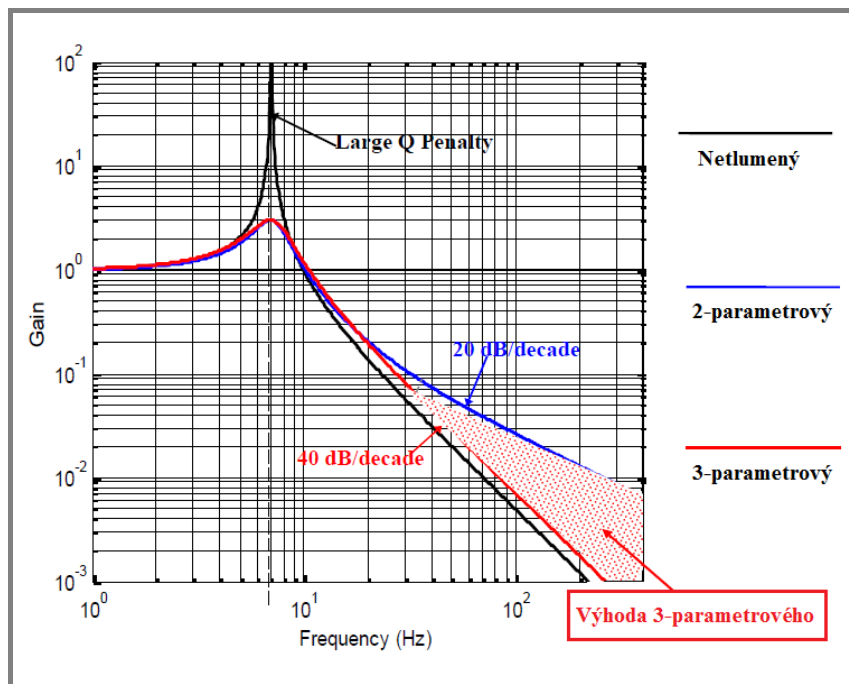


Obr. 5 Schématické zobrazení D-strut [9]



Obr. 6 Řez D-Strut [9]

Na obrázku 7 je znázorněna závislost přenosové funkce na frekvenci zatížení. Je patrné, že do přibližně 10 Hz, kde nastává rezonance, se 2-parametrová a 3-parametrová soustava chová podobně. Ve vyšších frekvencích vylepšuje objemová tuhost vlnovce K_B funkci vzpěry. Právě vlivem nedokonalého průtoku tlumící kapaliny skrz ventil dochází k projevu objemové tuhosti vlnovce [9].



Obr. 7 Odezva systému na budící frekvenci zatížení [3]

2.3 Vlnovec

Vlnovec neboli kovový měch je pasivní komponenta, která může fungovat na podobném principu jako pružina, u které platí vztah: deformační síla je přímo úměrná stlačení (posunutí) vlnovce. Stlačení může být až 60% jejich celkové délky a jsou navrhovány na životnost odpovídající až sta tisícům cyklů zatížení [10]. Kovové měchy se běžně aplikují při odstranění vibrací motoru a kinetiky řízení na odvod spalín ve výfukovém systému vozidel, zachycování tepelné roztažnosti a tlumení vysokofrekvenčních vibrací v oblasti motoru. Dalším odvětvím může být použití v odolných dělicích membránách a vysokotlakých palivových čerpadlech, nebo ve spojení s torzní tyčí se kovový vlnovec využívá k servořízení. K nejběžnějšímu použití vlnovců pak patří rozvody plynu a teplé vody [11].

Kovové vlnovce jsou vyráběny válcováním, svařováním, metodou hydroforming a galvanoplastikou. Vlnovce vyráběny poslední zmíněnou metodou mají bezproblémovou vnitřní stavbu a izotropní vlastnosti materiálu [12]. Galvanoplastikou je možné vyrábět vlnovce o velmi malé tloušťce – od $8\mu\text{m}$ [10].

Mezi světové výrobce vlnovcových trubic patří např. U. S. Bellows, Inc. [13], s pobočkou v České republice firma Witzenmann Opava, spol. s r.o. [14] a mnozí další, kteří se podílejí na tvorbě trhu.



Obr. 8 Kovový měch vyrobený galvanoplastikou s přírubami [12]

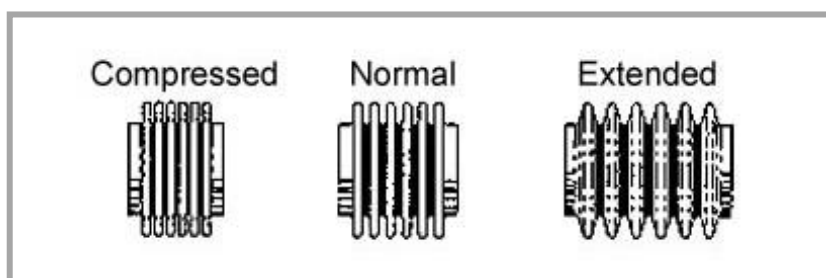
2.3.1

2.3.1 Způsoby zatížení vlnovců

Na základě typu zatěžování a následné deformace je možné vlnovce rozdělit do 3 skupin:

Osově stlačení/roztažení

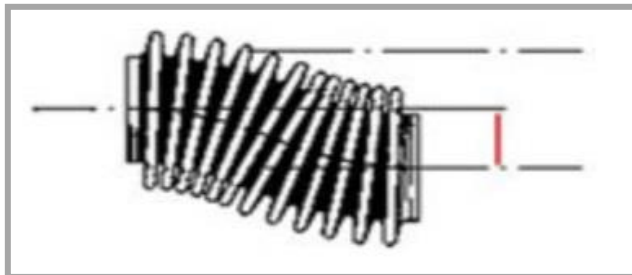
Takto zatížený ocelový měch je namáhán ve směru rovnoběžném s osou příčného průřezu. Osovým zatížením je vlnovec namáhán buď kompresí neboli stlačením, která způsobuje zkrácení celkové délky měchu, nebo roztáhnutím, které zapříčiňuje délkové protažení. Na základě použití konkrétního typu vlnovce a jeho následného zatížení jsou navrhovány dilatační spáry mezi jednotlivými vlnami vlnovce [15].



Obr. 9 Ukázka jednotlivých délek ocelových měchů [15]

Boční vychýlení

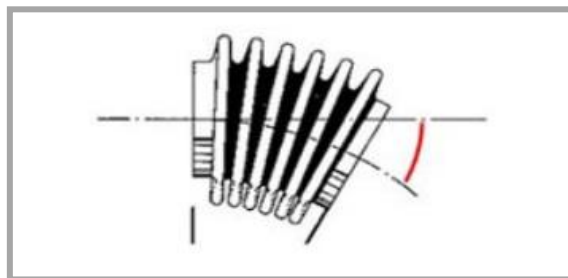
Nastává v momentě, kdy příčné průřezy konců vlnovce jsou rovnoběžné s jejich osami příčných průřezů, ale tyto osy jsou vůči sobě posunuty o určitou výchylku. Jedná se o tzv. paralelní spojení dvou konců [15].



Obr. 10 Paralelní zapojení dvou konců vlnovce. [15]

Úhlové vychýlení

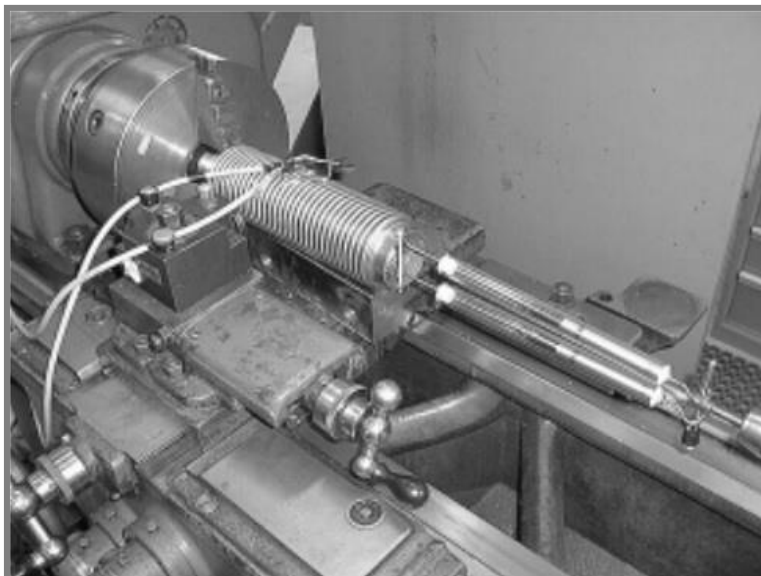
Takový případ se vyskytuje při ohýbání střední osy vlnovce, kdy příčné průřezy mezi sebou svírají libovolný úhel. Při konstrukci měchu pro úhlové vychýlení je úhel mezi příčnými průřezy konců důležitý z hlediska návrhu dilatační mezery mezi jednotlivými vlnami vlnovce [15].



Obr. 11 Úhlového vychýlení vlnovce [15]

2.4 Tuhost vlnovce

Problematikou tuhosti vlnovců se nezabývá mnoho lidí, a dokonce i samotní výrobci tomuto odvětví nevěnují příliš pozornosti. Ve svých magisterských pracích se věnují statickým výpočtům vlnovců Madeleine Hermann a Anderse Jönnsen z University of Karlskrona [16] a dynamickým výpočtům Tobias Lindberg a Stig Mörtman [17]. V jejich akademických pracích se věnují statickým výpočtům a odvození několika teoretických vztahů. Platnost vztahů byla ověřována výpočty pomocí metody konečných prvků anebo reálnými zkouškami v laboratoři. Autoři zavádějí několik pomocných proměnných, které jsou závislé na geometrii a materiálu vlnovce ovlivňující výslednou tuhost. Dle jejich získaných dat odpovídá reálná tuhost vlnovce 620 N/mm, vypočtená analyticky 950 N/mm. Platnost těchto vztahů je omezena na velmi malý rozsah rozměrů vlnovců [18].

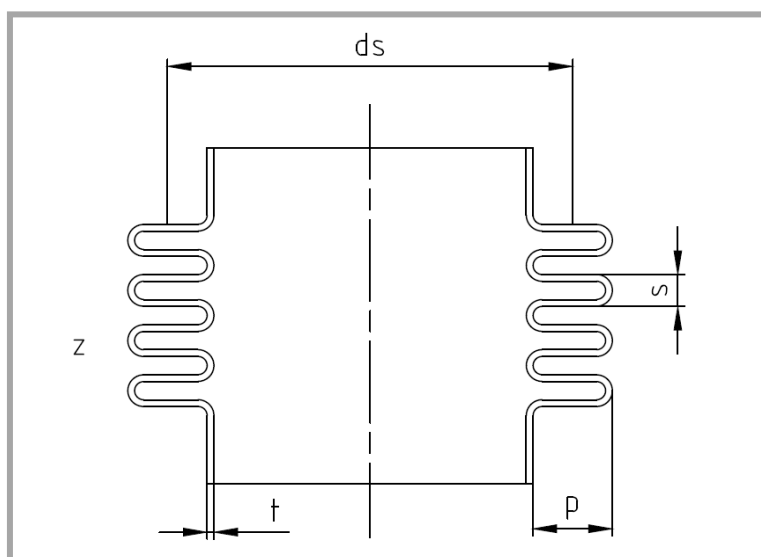


Obr. 12 Měření osově tuhosti vlnovců na soustruhu [16]

2.4.1 Stanovení délkové tuhosti pomocí metody konečných prvků

2.4.1

Souběžně s touto bakalářskou prací probíhá v rámci týmové práce na fakultě Strojního Inženýrství VUT v Brně na Ústavu konstruování projekt „Délková tuhost kovových vlnovců“ [16]. Zmíněné technické zprávě se věnují studenti Bc. Rostislav Brhlík, Bc. Michal Žlebek, Bc. Filip Dokoupil a Bc. Tomáš Taufer. Jejich cílem je za pomoci využití metody konečných prvků stanovit regresní vztahy k určení tuhostních charakteristik vlnovců. Pro svou simulaci zvolili běžně vyráběné vlnovce firmy Witzenmann Opava, spol. s r.o. ve 2 materiálových provedeních 1.4301 (AISI 304) a 1.4404 (AISI 316L), které byly následně rozděleny do skupin malý, střední a velký na základě svých rozměrů [18].



Obr. 13 Konstrukční parametry při průřezu vlnovcem [18]

Tab. 1 Vybrané vlnovce pro výpočet s různými hodnotami parametrů [18]

vlnovec (výrobní číslo)	malý (314115)	střední (370530)	velký (329325)
ds (mm)	18	81	36
s (mm)	1,05	3,90	2,35
p (mm)	4	11	7
t (mm)	0,50	0,50	0,50

Vzhledem ke zvoleným konstrukčním parametrům byly pomocí metody konečných prvků vyhodnoceny závislosti tuhosti vlnovce na jednotlivých geometrických parametrech, jako je např. tloušťka stěny, přesah vlny, aj. Z provedených simulací vyplynulo, že na axiální tuhost vlnovce má největší vliv tloušťka stěny s , naopak nejmenší podíl na změně tuhosti má střední průměr vlnovce ds .

Na základě simulací pomocí MKP byly odvozeny vztahy pro výpočet tuhosti vlnovce v rámci konkrétního rozsahu středního průměru kovového měchu a tloušťky plechu. Po dosazení příslušných geometrických rozměrů se získá výsledná tuhost vlnovce [18].

Tab. 2 Vztahy pro výpočet tuhosti vlnovce [18]

parametry (rozsah)	vztah pro výpočet tuhosti (ocel 1.4301)	vztah pro výpočet tuhosti (ocel 1.4404)	max. rel. chyba [%]
ds (60 ÷ 120 mm), s (2,6 ÷ 4 mm)	$k = 4,4ds + 4s + 4p + 23t$	$k = 4,27ds + 3,87s +4p + 23t$	3,45
ds (10 ÷ 40 mm), s (1,4 ÷ 2,9 mm)	$k = 80ds + 76s + 34p +10t$	$k = 77,69ds + 73,6s +34p + 10t$	5,78
ds (10 ÷ 100 mm), s (1,5 ÷ 3,5 mm)	$k = 15,3ds + 12s + 11p +100t$	$k = 14,43ds + 13s +11p + 100t$	6,78

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3

1. Na základě literatury přiblížit problematiku týkající se stanovení délkové a objemové tuhosti vlnovců. Popsat použití ocelových měchů v souvislosti se zmíněným tématem v tlumičích vesmírných raket.
2. Z průzkumu trhu a literárních pramenů zvolit vhodný typ vlnovce, který je možné použít k experimentálnímu stanovení jeho tuhostí. Pro porovnání rozměry vlnovce navázat na technickou zprávu „Délková tuhost kovových vlnovců“ [18]. Zajistit případné utěsnění vlnovce související s měřením objemové tuhosti.
3. Z experimentálně naměřených dat sestavit závislost axiální složky deformace na působící osově síle při prázdném a zaplněném vlnovci tlumící kapalinou. Ze získaných směrnic lineárních průběhů závislostí stlačovacích křivek stanovit výsledné hodnoty délkové a objemové tuhosti.
4. Posoudit vhodnost použití zakoupeného nerezového vlnovce v hermeticky uzavřených tlumičích určených pro kosmonautiku. Popřípadě porovnat experimentální data s výsledky simulace metodou konečných prvků.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Volba vlnovce

Na základě 3 možných rozsahů z výše uvedené technické zprávy [18] pro střední průměr a tloušťku plechu vlnovce jsem zvolil poslední interval - d_s ($10 \div 40$ mm), s ($1,4 \div 2,9$ mm), aby bylo případně možné srovnat výsledky experimentu a MKP. Rozsah zaručil největší rozmezí hodnot na úkor maximální relativní chyby, nicméně relativní chyba je zanedbatelná k zaručení přesnosti výsledků a pohybuje se v řádech pouhých procent. Po průzkumu trhu vlnovců jsem se rozhodl zvolit běžně dostupný podélně svařovaný vlnovec vyráběný do výfukových systémů automobilů. Jedná se o jednoduchou a levnou variantu, která se vyrábí v několika standardizovaných průměrech a délkách. Takový typ nerezového vlnovce se prodává s drátěným vnějším a vnitřním opletem a ocelovými nátrubky, které chrání vlnovec před provařením při montáži do výfukového systému. V důsledku levné ceny takto zvoleného vlnovce je jeho nevýhodou nepřesnost geometrických rozměrů, čímž je myšleno např. různá rozteč mezi vlnami či nepřesnost vinutí vln.



Obr. 14 Vlnovec z nerezové oceli s vnitřním a vnějším opláštěním [19]

Zakoupený vlnovec byl opleten z vnější a vnitřní strany se základními rozměry 50x200mm (průměr válcové části x délka celého vlnovce).

4.1.1 Naměřené parametry vlnovce

Střední průměr	$d_s = 61$ mm
Tloušťka vlny	$s = 7$ mm
Přesah vlny	$p = 8$ mm
Tloušťka plechu	$t = 0,7$ mm
Počet vln celého vlnovce	$z_1 = 17$
Počet vln bez náběhových vln	$z_2 = 15$

4.2 Zavičkování vlnovce

Z důvodu měření objemové tuhosti bylo nutné vlnovec zaplnit olejem, který fungoval jako tlumící kapalina. Na základě nutnosti ocelový měch utěsnit byla vyrobena hliníková víčka, která byla nasunuta do válcových konců vlnovce a pomocí těsnících o-kroužků zabránila úniku oleje. U obou víček byl použit o-kroužek 48,00x2,00 NBR 70 Sh dle DIN 3770. Na čele jednoho víčka byla vyvrtána závitová díra pro utěšňovací šroub a k odvodušnění.



Obr. 15 Použitá víčka k utěsnění válcových konců vlnovce

4.3 Použitá měřidla a zařízení

Vyhodnocovací software: DEWESoft

Snímač posunutí: laserový snímač Baumer OADM 20U2460/S14C

Měřidlo velikosti síly: Tenzometrický siloměr, typ 1,6-2, výrobní číslo: 70 753

Měřicí zařízení: Ruční lis s hydraulickým přitlakem CTC5

4.4 Příprava a postup měření

Zakoupený vlnovec byl pokryt z vnější i vnitřní strany kovovým opletem, který byl po odstranění ocelových nátrubků odstříhnut pomocí nůžek na plech. Po obnažení bylo možné provést řádné změřením potřebných rozměrů vlnovce, které jsou pro jeho tuhost zásadní. Na základě změřených válcových koncovek ocelového měchu byly vytvořeny dva výrobní výkresy těsnících víček a následně byla zakoupena vhodná těsnění. Po nasazení těsnících o-kroužků do drážek víček byla víčka opatrně nasunuta do válcové části vlnovce tak, aby nedošlo k ustřížení nebo ke skřípnutí těsnících kroužků. Z vnější strany byl na obou koncích ocelový měch v místech víček stáhnut ocelovými stahovacími páskami k zajištění polohy těsnících ploch a k eliminaci nepřesnosti válcových konců vlnovce, které byly po sundání nátrubků částečně pomačkané. K vyvození dostatečně stlačovací síly vlnovce byl použit běžný ruční lis s hydraulickým přitlakem litinové konstrukce, který se běžně používá k montáži a demontáži pouzder, ložisek. Upnutý tenzometrický siloměr v upínací dutině lisu měřil sílu působící na čelní plochu zavičkováného vlnovce. Na stůl pod tenzometrický siloměr byl ve stojánku umístěn laserový snímač vzdálenosti značky Baumer vyhodnocující aktuální polohu stokrát za vteřinu. Oba snímače byly následně pomocí kabelu spojeny s počítačem, ve kterém byl k vyhodnocení dat použit software DEWESoft.



Obr. 16 Upravený vlnovec přichystaný k experimentu

Po zkalibrování a zkontrolování správné funkčnosti všech zařízení byl na stůl ručního lisu položen zavíčkovaný, prázdný vlnovec. Při měření délkové tuhosti bylo následně provedeno několik sérií měření po dobu 30 vteřin. Vlnovec byl pomalu stlačován v přibližném rozmezí 0 až 12 mm silou cca 0 až 400 N.



Obr. 17 Sestavení měřícího zařízení

Získaná data byla zaznamenávána a ukládána pomocí zmíněného softwaru. Takto sestavené měření se opakovalo přibližně pětkrát, až bylo shromážděno dostatečné množství dat. Následně se prázdný vlnovec sundal ze stolu lisu a vyplnil se olejem pomocí injekční stříkačky skrz závitovou díru ve víčku. Po naplnění a zkontrolování těsnosti víček byl do závitové díry ve víčku vložen imbusový šroub M5 s měděnou podložkou. Podobným principem pokračovalo měření objemové tuhosti vlnovce. Naměřená data byla opět zpracována počítačem pomocí software DEWESoft. Při měření objemové tuhosti byl ocelový měch zatěžován a stlačován v rozmezích cca 0 až 3500 N a 0 až 6 mm. Vlivem nepřesných válcových ploch na trubkových koncích vlnovce docházelo při stlačování k částečnému úniku oleje, proto byl po každém měření olej doplněn a postup se opakoval.



Obr. 18 Ustavení vlnovce do lisu společně s měřicími snímači

4.5 Analýza chování tlumiče se skutečnými a naměřenými tuhostmi vlnovce

4.5

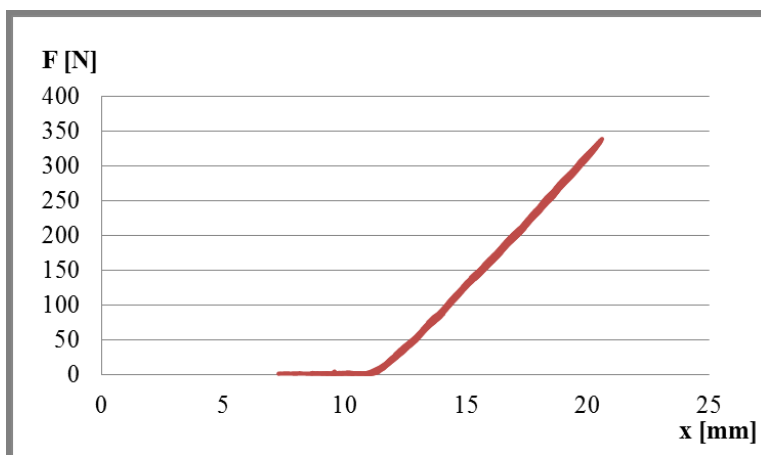
Za účelem porovnání a zhodnocení naměřených dat byl v softwaru MathCad sestaven výpočtový model, pomocí něhož byly vykresleny závislosti charakterizující vlastnosti skutečného tlumiče s reálným poměrem tuhostí vlnovce, který využívá firma Honeywell – viz kapitola D-Strut. Veškeré grafické průběhy byly vykreslovány ve stejném duchu jako grafy firmy Honeywell pro konkrétní hmotu nákladu, vlastnosti tlumiče, pneumatické pružiny a vlnovce. Následně do sestaveného výpočtu byly dosazeny konečné hodnoty experimentálně získané délkové a objemové tuhosti měřeného vlnovce tak, aby případně došlo k rozdílnému chování imaginárního tlumiče. Konkrétně byly vykresleny grafické průběhy přenosové funkce v závislosti na frekvenci zatížení – viz kapitola Výsledky.

5 VÝSLEDKY

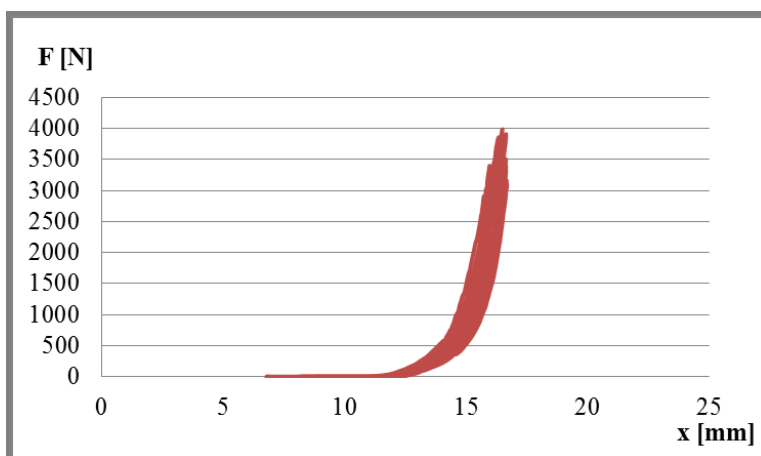
5.1 Vyhodnocení naměřených dat

Na základě postupu měření viz kapitola Příprava a postup měření byla získána data k určení délkové a objemové tuhosti použitého vlnovce. Každé měření bylo provedeno přibližně pětkrát za pomoci software DEWESoft, který po dobu třicet vteřin zaznamenával hodnoty do paměti. Při působení síly na kovový měch má grafický průběh stlačování pozvolný růst způsobený postupným usazením jednotlivých vln vlnovce. U zaplněného vlnovce olejem dochází nejprve k odvzdušnění utěsněného prostoru a také k vyrovnání vnitřních tlaků v tlumící kapalině. Až po tomto nelineárním grafickém průběhu závislosti axiální deformace na působící síle nabývají data přímkové podoby. Pro stanovení tuhosti vlnovce je zapotřebí právě tato lineární část grafu naměřených dat. Vzhledem k tomu byly získané hodnoty zpracovány a vytříděny pomocí softwaru Microsoft Excel.

Z grafů všech průběhů při měření délkové a objemové tuhosti vlnovce – viz grafy 1 a 2, je patrné, že při nezaplňném kovovém měchu závislost F [N] – x [mm] při stlačování obíhá teoreticky stále stejnou křivku. Při měření K_B docházelo k částečnému úniku oleje, což způsobovalo posun grafické závislosti.



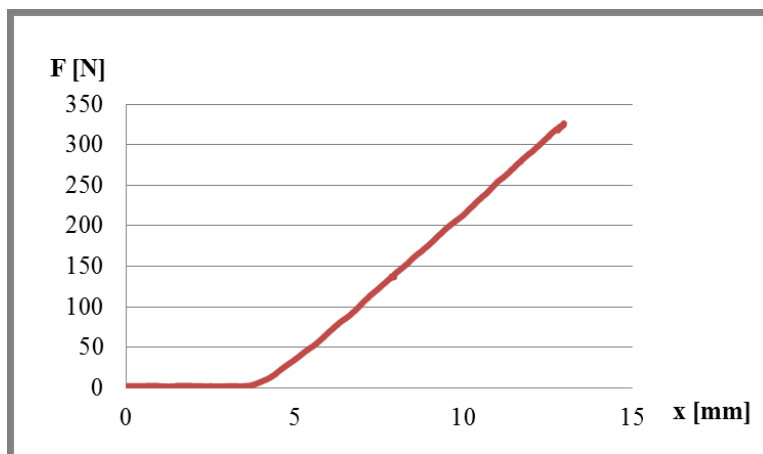
Graf 1. Závislost axiální složky deformace na stlačovací síle měřená v intervalu 30 vteřin při prázdném vlnovci (dédková tuhost)



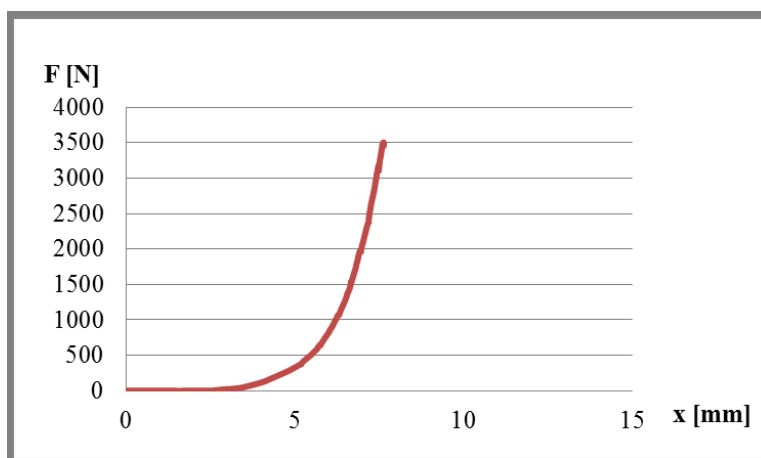
Graf 2. Závislost axiální složky deformace na stlačovací síle měřená v intervalu 30 vteřin při zaplněném vlnovci olejem (objemová tuhost)

5.1.1 Separace a vytřídění lineárních dat

Jednotlivé křivky z grafického průběhu při stlačování a rozpínání vlnovce byly vyseparovány k získání lineární závislosti axiální deformace vlnovce na působící síle. Zároveň byly průběhy posunuty do počátku z důvodu zkalibrovaného laserového měřiče, který nebyl ideálně nastaven na rozsah nestlačené délky vlnovce.



Graf 3. Závislost axiální složky deformace na stlačovací síle při prázdném vlnovci (délková tuhost)



Graf 4. Závislost axiální složky deformace na stlačovací síle při zaplněném vlnovci olejem (objemová tuhost)

5.1.2 Směrnice vyhodnocených přímk

Pro získání potřebných hodnot délkové a objemové tuhosti měřeného vlnovce se ze získaných závislostí, vyřídily přímkové úseky průběhů F [N] – x [mm], kde daná tuhost představuje směrnici dané přímky. Z měření prázdného vlnovce se za lineární úsek uvažoval rozsah síly cca 50 až 300N, zatímco při stlačování zaplněného vlnovce nabýval graf přímkové podoby v rozmezí přibližně 1500 až 3500N – viz grafy 3 a 4. Veškeré získané směrnice přímk pro délkovou a objemovou tuhosti jsou uvedeny v tabulce 3 a výsledné velikosti délkové a objemové tuhosti byly vypočítány jejich aritmetickým průměrem.

Tab. 3 Naměřené délkové a objemové tuhosti jednotlivých stlačovacích křivek vlnovce

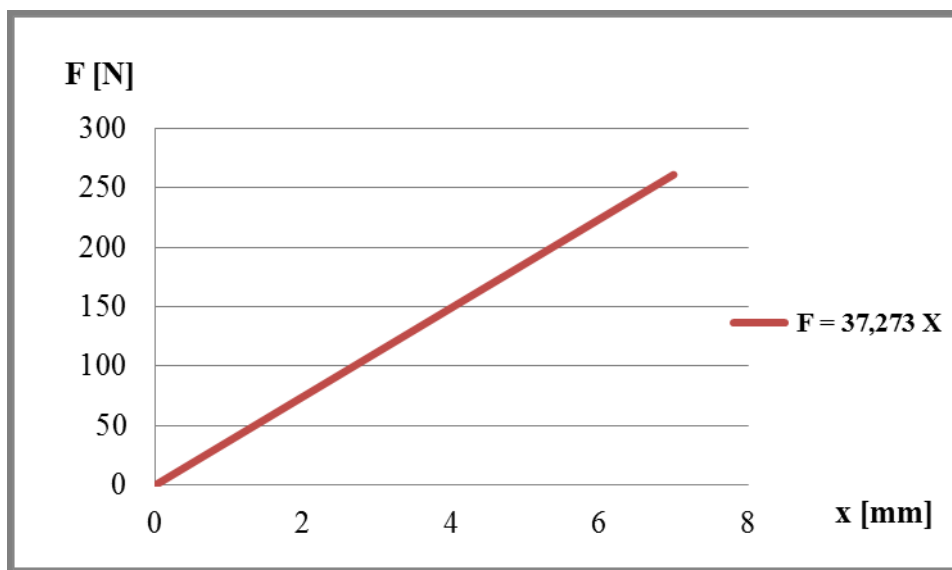
Délková tuhost K_A [N/mm]			Objemová tuhost K_B [N/mm]		
$F = K_A \cdot x$			$F = K_B \cdot x$		
37,200	37,164	37,274	2533,4	2693,0	2561,8
37,946	37,340	37,341	2787,7	2360,7	3072,6
37,471	37,298	37,324	2640,3	2905,9	2600,4
37,310	37,018	37,574	2702,7	2301,2	2709,0
37,287	37,635	37,195	2772,9	2665,0	2573,4
37,440	37,506	36,523	2589,5	2899,9	2300,6
37,237	37,000	37,125	3015,1	2985,6	2923,3
37,223	37,005	37,242			
37,261	37,157				
Medián		37,268	Medián		2693,0
Aritmetický průměr		37,273	Aritmetický průměr		2695,0

5.2 Délková a objemová tuhost vlnovce

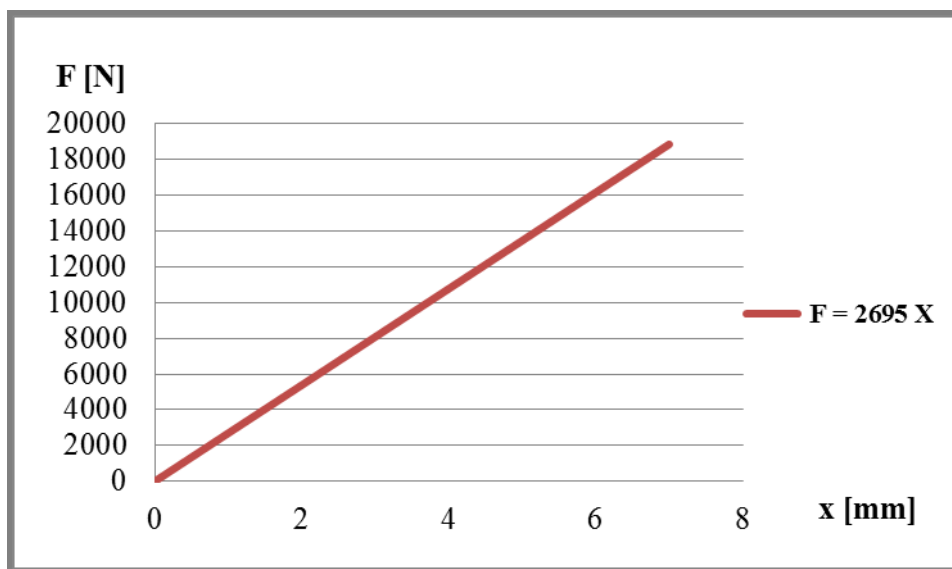
délková tuhost: $K_A = 37,273 \text{ N/mm}$

objemová tuhost: $K_B = 2695,0 \text{ N/mm}$

poměr objemové a délkové tuhosti: $p = \frac{K_B}{K_A} = \frac{2695,0}{37,273} = 72,3$



Graf 5. Lineární závislost axiální deformace na stlačovací síle se směrnicí výsledné délkové tuhosti vlnovce



Graf 6. Lineární závislost axiální deformace na stlačovací síle se směrnicí výsledné objemové tuhosti vlnovce

5.3 Teoretický model tlumiče s reálnými a naměřenými hodnotami

Na základě výpočtového modelu byly pomocí softwaru MathCad vykreslena přenosová funkce v závislosti na budící. Grafy znázorňují porovnání chování dvouparametrové soustavy o celkové tuhosti prázdného vlnovce a pružiny a tříparametrové soustavy.

5.3.1 Chování tlumící soustavy se skutečnými a naměřenými tuhostmi

Při porovnání teoretického modelu vzpěry D-Strut a vzpěry s naměřenými hodnotami délkové a objemové tuhosti je patrné, že největší rozdíl nastává v poměru objemové a délkové tuhosti vlnovce. U měřeného vlnovce byla zjištěna jiná hodnota poměru objemové a délkové tuhosti než u kovového měchu, který je v D-Strut od firmy Honeywell. Při pokusu přiblížit se grafickému průběhu přenosové funkce uváděnému firmou Honeywell u D-Strut bylo zjištěno, že poměr objemové a délkové tuhosti je v rozmezí 2 až 3. Měřený vlnovec měl tento parametr mnohonásobně vyšší - 72,3.

Zjištěné rovnice přenosových funkcí u dvouparametrové a tříparametrové soustavy:

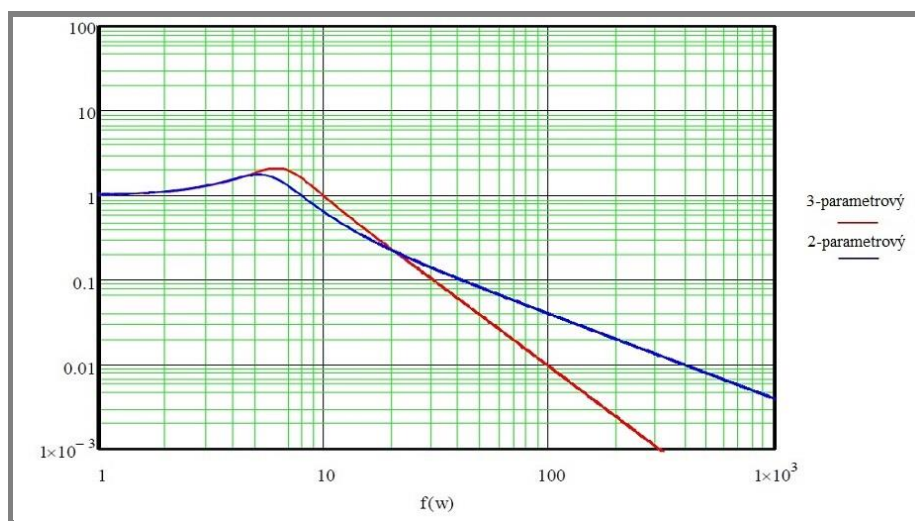
Přenosová funkce tři-parametrové soustavy:

$$ha(\omega) = \left| \frac{K_A + \frac{K_B \cdot (i\omega) \cdot C_A}{C_A \cdot (i\omega) + K_B}}{(i\omega)^2 \cdot M + (i\omega) \cdot C_A + K_A - \frac{[(i\omega) \cdot C_A]^2}{(i\omega) \cdot C_A + K_B}} \right|$$

Přenosová funkce dvouparametrové soustavy:

$$hb(\omega) = \left| \frac{K_A + (i\omega) \cdot C_A}{(i\omega)^2 \cdot M + (i\omega) \cdot C_A + K_A} \right|$$

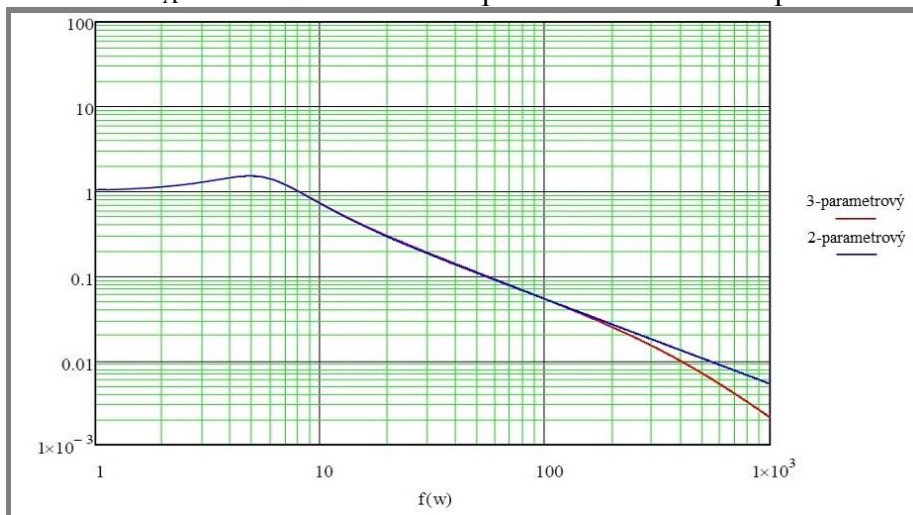
Poznámka: V níže uvedených grafech představuje červená barva grafický průběh chování tříparametrové tlumicí soustavy, modrá barva představuje dvouparametrovou.



Graf 7. Závislost přenosové funkce na frekvenci zatížení u modelu vzpěry D-Strut

Graf 8. Závislost přenosové funkce na frekvenci zatížení u vzpěry s měřeným vlnovcem

Grafy 9 a 10 znázorňují přenosovou funkci vzpěry D-Strut a imaginárního tlumiče s měřeným vlnovcem uvnitř. Chování D-Strut bylo sestaveno na základě uváděných podkladů firmou Honeywell [3]. Z přenosové funkce vzpěry s měřeným vlnovcem vyplývá – viz Graf 10, že ve vysokých frekvencích nedochází k vylepšení chování tlumiče C_A a soustava dvouparametrová a tři-parametrová se chov

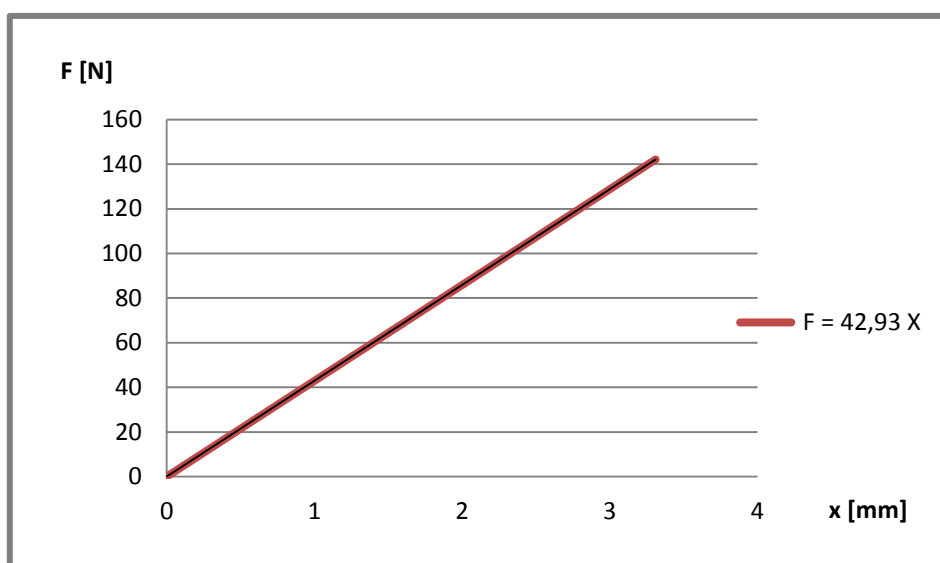


ají téměř stejně. Taková vzpěra by byla příliš tuhá a docházelo by k přenosu vibrací z vesmírného nosiče na náklad.

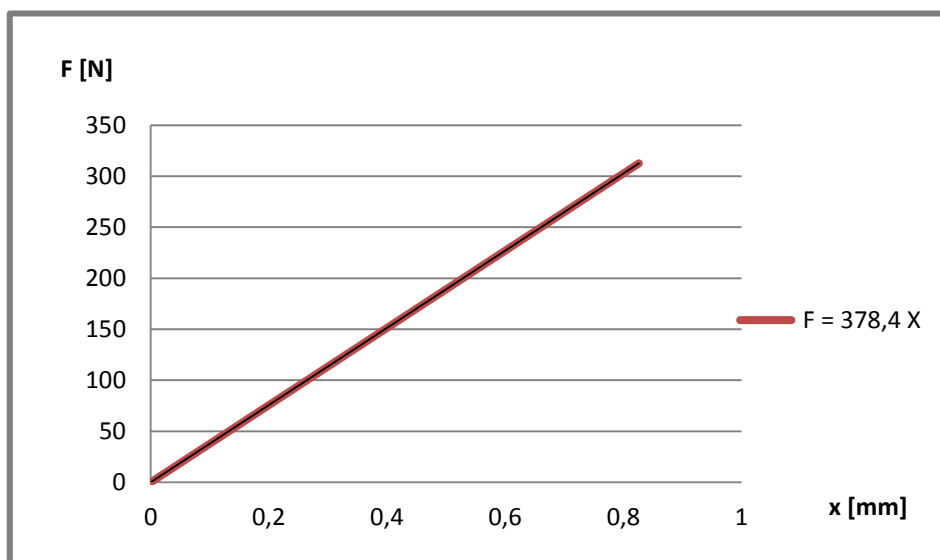
5.4 Výpočet vlnovce metodou konečných prvků

Ve spolupráci se studenty pracující na technické zprávě Délková tuhost kovových vlnovců [10], byl zakoupený vlnovec vymodelován v prostředí ANSYS a metodou konečných prvků byla vypočítána délková tuhost zakoupeného vlnovce. Při tvorbě modelu a výpočtu vlnovce byl zvolen stejný postup jako v technické zprávě zabývající se čistě MKP – viz Délková tuhost kovových vlnovců [10]. Výpočet byl proveden u dvou modelů.

V prvním případě došlo k vymodelování vlnovce o stejných geometrických parametrech, jako měl zakoupený nerezový vlnovec. Ve druhém případě byl počítán vlnovec se zkrácenou délkou vlny tak, aby na sebe jednotlivé půlkružnice přechodových poloměrů vln navazovaly a nevznikaly tak rovné úseky, které zvyšují poddajnost vlnovce. Podobně jako u experimentu odvozena závislost axiální deformace na působící síle.



Graf 9. Lineární závislost axiální deformace na stlačovací síle zakoupeného vlnovce z výpočtu MKP



Graf 10. Lineární závislost axiální deformace na stlačovací síle vlnovce s upravenou geometrií vlny z výpočtu MKP

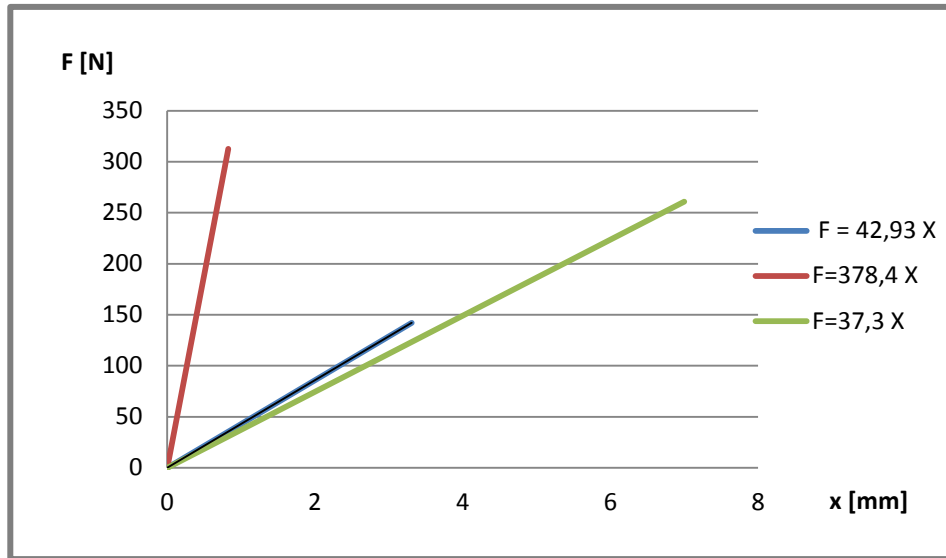
6 DISKUZE

Na základě doporučených intervalů středních průměrů a tloušťky plechu vlnovce byl zakoupen nerezový kovový měch, u něhož byla následně změřena závislost axiální deformace na působící osově síle. Z naměřených dat byly vyhodnoceny výsledné velikosti délkové a objemové tuhosti. Jak je patrné z uvedené směrnice – viz kapitola Výsledky, jednotlivé naměřené hodnoty délkové tuhosti se od sebe liší pouze v řádech desetin a dá se tak usoudit, že prázdný vlnovec se chová homogenně. U výsledků objemové tuhosti byl naopak zpozorován velký rozptyl jednotlivých směrnic přímk. Dá se předpokládat, že na tento fakt měl největší vliv částečný únik oleje během stlačování a také vinutí vln kovového měchu. Jelikož se jedná o lehce dostupný a levný vlnovec, nedá se předpokládat vysoká přesnost při výrobě, a právě díky tomu nejsou jednotlivé vlny ideálně rovnoběžné.

Z výsledných hodnot K_A , K_B je zřejmý velký nárůst tuhosti vlnovce po zaplnění olejem, která se mnohonásobně zvýšila. Schopnost vlnovce odolávat zatížení po zaplnění tlumičí kapalinou se předpokládá, avšak poměr mezi změřenou objemovou a délkovou tuhostí je překvapivě mnohonásobně větší. Vzhledem ke zmíněným číselným vlastnostem vlnovce dochází při nezaplňeném stavu k velice poddajnému chování, zatímco vyplněním olejem se měch stává výrazně tuhý.

V prostředí MathCad došlo k vytvoření výpočtu přenosové funkce u modelu vzpěry D-Strut tak, aby se chování systému při zatěžování shodovalo se zveřejněnými průběhy u zařízení firmy Honeywell. Následně se do teoretického modelu dosadily naměřené hodnoty tuhostí, čímž byl vytvořen teoretický model tlumiče s experimentálně měřeným vlnovcem. Základní rozdíl při porovnání chování mezi obyčejným vlnovcem do výfukových systémů aut a vlnovcem specializovaným pro hermeticky uzavřené tlumiče je v rozdílné hodnotě poměru objemové a délkové tuhosti. Předpokládám, že kovové měchy využívané v kosmonautice se skládají ze zaoblených vln s malým přesahem, které jsou na sebe jednotlivě jako prstence navařovány. Ideální přesah vlny sestává pouze z jednotlivých půlkružnic, které na sebe vzájemně navazují na rozdíl od nerezového vlnovce do výfukových systémů aut. Ten má velký přesah vlny a tvar vlny se skládá z rovinných úseků rovnoběžných s čelem vlnovce. Přesah a tvar vlny je tedy geometrický parametr, který má zásadní vliv na poddajnost takto využívaného kovového měchu.

Při porovnání se získanými výsledky v předchozích akademických pracích jsem měl možnost se opřít o hodnoty délkové tuhosti, jelikož jsem nenarazil na žádný dokument, který by se zabýval problematikou objemové tuhosti. Např. mezi diplomovou prací od Madeleine Hermanna a Andersena Jönnsena [16] a mou bakalářskou prací dochází k několikanásobnému rozdílu naměřené či vypočítané hodnoty délkové tuhosti vlnovce. Ačkoliv se jedná o srovnání dvou vlnovců různých geometrických rozměrů, mnou zvolený typ je nejméně desetkrát méně tuhý v axiálním směru při stlačování. Stejně porovnání je možno provést s technickou zprávou *Délková tuhost kovových vlnovců* [10] vzhledem k získaným výpočtům měřeného vlnovce pomocí MKP. Výsledná délková tuhost modelu totožného vlnovce s měřeným ocelovým měchem je oproti naměřené hodnotě přibližně stejná.



Graf 11. Srovnání naměřené a simulovaných hodnot MKP

Rozdíl hodnot může být způsoben v důsledku dvou náběhových menších vln, které jsou na zakoupeném vlnovci, dále ve výrobní nepřesnosti roztečí a stoupání vln. Právě tyto vady řešený model vlnovce MKP nezahrnoval. I přesto se dají považovat neměřená a vypočítaná hodnota v MKP za velmi blízké. Metodou konečných prvků byla také zjištěna délková tuhost vlnovce se zkrácenými vlnami, které na sebe navazují jednotlivými půlkružnicemi a nemají tak velký přesah. Výsledek se blíží číslům uváděným v diplomové práci od Madeleine Hermanna a Andersena Jönnsena [16]. Na základě výše uvedeného došlo k potvrzení, že důležitý je přesah a tvar vlny. Zmíněné parametry ovlivňují výslednou hodnotu délkové tuhosti, a tím také důležitý poměr K_B a K_A . U jiného typu vlnovce by byl tento poměr mnohonásobně menší než podíl hodnot získaných měření a došlo by tak k výrazné změně chování eventuálního tlumiče.

7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá poznáním bližších vlastností vlnovcových trubic, které se v současnosti využívají u moderní konstrukce tlumičů vesmírných raket. Jelikož se nejedná o příliš rozšířené téma, patří jakékoliv nové poznatky v této oblasti k dalšímu kroku např. při konstrukci vesmírných tlumičů.

Na základě zvoleného postupu byl zakoupen nerezový vlnovec, u kterého se dle zmíněných dílčích kroků změřila závislost axiální deformace vlnovce na působící síle. Ze získaných průběhů byl vyhodnocen konečný výsledek délkové a objemové tuhosti. Chování měřeného vlnovce v imaginárním tlumiči bylo posouzeno a vykresleno pomocí modelu v softwaru MathCad.

Zhodnocením na závěr je, aby u použitého vlnovce došlo ke změně poměru objemové a délkové tuhosti, čímž by nastala celková změna chování vlnovce při zatěžování. Dle mého názoru byl základním problémem špatně zvolený typ vlnovce. Mnou zakoupený kovový měch používaný ve výfukových systémech aut slouží primárně k pružnému spojení dvou konců výfuku. Vzhledem k tomuto faktu se jedná o velice poddajný díl, který kompenzuje otřesy a vibrace vzniklé během jízdy automobilu. Pro budoucí postup týkající se řešené problematiky bych navrhl volbu jiného typu vlnovce, který je primárně určen k tlumení axiální síly s malým přesahem vlny a přesnější konstrukce, u kterého by se mohl daný měřicí cyklus opakovat.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Kosmonautika od A do Z [online]. 2009 [cit. 2014-02-28]. Dostupné z: <http://kosmonautika.eu/raketa.php>
- [2] MEK - Rakety Ares. MEK - Mala encyklopedie kosmonautiky [online]. 2009 [cit. 2014-03-03]. Dostupné z: <http://mek.kosmo.cz/nosice/usa/ares/index.htm>
- [3] Kosmické nosiče. MEK Mala encyklopedie kosmonautiky [online]. 1996, 28.10.2009 [cit. 2014-03-03]. Dostupné z: <http://mek.kosmo.cz/nosice/index.htm>
- [4] RUEBSAMEN T. DALE. Summary of Launch Vibration Isolation System. Glendale, Arizona: Honeywell Aerospace. 2012
- [5] S. JOHAL, Raman, Paul S. WILKE a Conor D. JOHNSON. Rapid Coupled Loads Analysis and Spacecraft Load Reduction Using SoftRide. 23rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2009.
- [6] Johnson, C. D., Wilke, P. S. PROTECTING SATELLITES FROM THE DYNAMICS OF THE LAUNCH ENVIRONMENT, CSA Engineering, Inc., In: American Institute of Aeronautics and Astronautics, CA, 2001
- [7] S. WILKE, Paul, Conor D. JOHNSON a Kenneth R. DARLING. Whole-Spacecraft Vibration Isolation Flown on the Minotaur Launch Vehicle. 15th Annual/USU Conference on Small Satellites. 2001.
- [8] ŠVÁBÍK, R. Vibroizolační plošina pro kosmonautiku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 60 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.
- [9] ELVIS Cross Link D-Strut Detail. Glendale, Arizona: Honeywell Aerospace. 2013
- [10] ROBYR, Sébastien. FEM modelling of a bellows and a bellows-based micromanipulator [online]. Espoo: Helsinki University of Technology, 1999 [cit. 2014-03-14]. ISBN 95-122-4471-3. Dostupné z: <http://autsys.aalto.fi/pub/control.tkk.fi/rpt/r113isbn9512244713.pdf>. Helsinki university of technology
- [11] Kovové vlnovce a kompenzátory. Witzenmann Opava spol. s r.o.: Použití [online]. 2014 [cit. 2014-03-14]. Dostupné z: <http://www.witzenmann.cz/witzenmann/wicz/anwendungen/abgas.php>
- [12] NiCoForm inc.: Performance NiColoy® Bellows and Assemblies [online]. 2014 [cit. 2014-03-14]. Dostupné z: <http://nicoform.com/products/high-performance-bellows>
- [13] U.S. Bellows: Manufacturer Expansion Joints and Bellows - Houston, TX [online]. 2011 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: <http://www.usbellows.com>

- [14] Home | Hydra | WITZENMANN [online]. 2013 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: <http://www.witzenmann.cz>
- [15] Types of Metallic Bellows Deflections. U.S. Bellows, Inc. [online]. 2011 [cit. 2014-03-14]. Dostupné z: http://www.usbellows.com/literature/bellows_deflections.html
- [16] HERMANN, Madeleine a Anders JÖNSSON. Static Characteristic of Flexible Bellows [online]. Karlskrona, Sweden, 1997 [cit. 2014-03-14]. ISRN: HK/R-IMA-EX--1997/D-01--SE. Dostupné z: [http://www.netlearning2002.org/fou/cuppsats.nsf/all/0ae0c313baa5342ac1256e15002a4684/\\$file/Static%20characteristics%20of%20Flexible%20Bellows.pdf](http://www.netlearning2002.org/fou/cuppsats.nsf/all/0ae0c313baa5342ac1256e15002a4684/$file/Static%20characteristics%20of%20Flexible%20Bellows.pdf). Master's Degree Thesis. University of Karlskrona/Ronneby. Vedoucí práce Göran Broman, Ph.D. Mech.Eng.
- [17] LINDBERG, Tobias a Stig MÖRTMAN. Dynamic Characteristics of Flexible Bellows. Karlskrona, Sweden, 1998. [cit. 2014-03-14]. Dostupné z: [http://www.netlearning2002.org/fou/cuppsats.nsf/all/c125660f002ea348c12568a3002cabc6/\\$file/Dynamic%20Characteristics%20of%20Flexible%20Bellows.pdf](http://www.netlearning2002.org/fou/cuppsats.nsf/all/c125660f002ea348c12568a3002cabc6/$file/Dynamic%20Characteristics%20of%20Flexible%20Bellows.pdf). Master's Degree Thesis. Department of Mechanical Engineering University of Karlskrona/Ronneby. Vedoucí práce Anders Jönsson, M.Sc. Mech. Eng.
- [18] BRHLÍK, Bc. Rostislav, Bc. Michal ŽLEBEK, Bc. Filip DOKOUPIL a Bc. Tomáš TAUFER. Délková tuhost kovových vlnoců. Brno, 2013. Týmový projekt (ZKP) - Technická zpráva. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. David Nečas.
- [19] Výfukové systémy. Starline-parts [online]. 2007 [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: http://www.starline-parts.com/data/articles/down_167.pdf

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

aj. - a jiné
apod. - a podobně
atd. - a tak dále
např. - na příklad
MKP - metoda konečných prvků

K_A [N/mm] - délková tuhost
 K_B [N/mm] - objemová tuhost
 p [1] - poměr objemové a délkové tuhosti
 M [Kg] - hmotnost nákladu
 ω [1/s⁻¹] - budící frekvence
 C_A [Ns/mm] - konstanta tlumiče
 i [1] - imaginární jednotka

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1	Start rakety Ares 5 [2]	14
Obr. 2	Schéma umístění nákladu a tlumicího systému [4]	15
Obr. 3	Tlumič systému D-strut od firmy Honeywell [3]	16
Obr. 4	Vibroizolační systém ELVIS od firmy Honeywell [3]	16
Obr. 5	Schématické zobrazení D-strut [9]	17
Obr. 6	Řez D-Strut [9]	17
Obr. 7	Odezva systému na budící frekvenci zatížení [3]	18
Obr. 8	Kovový měch vyrobený galvanoplastikou s přírubami [12]	19
Obr. 9	Ukázka jednotlivých délek ocelových měchů [15]	19
Obr. 10	Paralelní zapojení dvou konců vlnovce. [15]	20
Obr. 11	Úhlového vychýlení vlnovce [15]	20
Obr. 12	Měření osově tuhosti vlnovců na soustruhu [16]	21
Obr. 13	Konstrukční parametry při průřezu vlnovcem [18]	21
Obr. 14	Vlnovec z nerezové oceli s vnitřním a vnějším opláštěním [19]	24
Obr. 15	Použitá víčka k utěsnění válcových konců vlnovce	25
Obr. 16	Upravený vlnovec přichystaný k experimentu	26
Obr. 17	Sestavení měřicího zařízení	26
Obr. 18	Ustavení vlnovce do lisu společně s měřicími snímači	27
Graf 1.	Závislost axiální složky deformace na stlačovací síle měřená v intervalu 30 vteřin při prázdném vlnovci (délková tuhost)	28
Graf 2.	Závislost axiální složky deformace na stlačovací síle měřená v intervalu 30 vteřin při zaplněném vlnovci olejem (objemová tuhost)	28
Graf 3.	Závislost axiální složky deformace na stlačovací síle při prázdném vlnovci (délková tuhost)	29
Graf 4.	Závislost axiální složky deformace na stlačovací síle při zaplněném vlnovci olejem (objemová tuhost)	29
Graf 5.	Lineární závislost axiální deformace na stlačovací síle se směrnici výsledné délkové tuhosti vlnovce	31
Graf 6.	Lineární závislost axiální deformace na stlačovací síle se směrnici výsledné objemové tuhosti vlnovce	31
Graf 7.	Závislost přenosové funkce na frekvenci zatížení u modelu vzpěry D-Strut	33
Graf 8.	Závislost přenosové funkce na frekvenci zatížení u vzpěry s měřeným vlnovcem	33
Graf 9.	Lineární závislost axiální deformace na stlačovací síle zakoupeného vlnovce z výpočtu MKP	34
Graf 10.	Lineární závislost axiální deformace na stlačovací síle vlnovce s upravenou geometrií vlny z výpočtu MKP	34
Graf 11.	Srovnání naměřené a simulovaných hodnot MKP	36

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Vybrané vlnovce pro výpočet s různými hodnotami parametrů [18]	22
Tab. 2	Vztahy pro výpočet tuhosti vlnovce [18]	22
Tab. 3	Naměřené délkové a objemové tuhosti jednotlivých stlačovacích křivek vlnovce	30

12 SEZNAM SAMOSTATNÝCH PŘÍLOH

12

Číslo dokumentu:	2-A4-30/05	výkres
Číslo dokumentu:	1-A4-30/05	výkres
Název dokumentu:	Naměřená data	PDF
Přiložené CD obsahuje:		
-	Bakalářská práce	PDF
-	Přílohy	