TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: N2612 - ELEKTROTECHNIKA A INFORMATIKA Studijní obor: 3906T001 - Mechatronika (ME)

Analýza indukovaných vibrací na modelu letounu

Analysis of mechanically and flow induced vibration of airplane prototype

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Vedoucí práce: Konzultant: Bc. **Tomáš Vala** Ing. Petr Šidlof, Ph.D. Doc. Ing. Antonín Potěšil, CSc.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinností informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Autor vyjadřuje poděkování svému školiteli Ing. Petru Šidlofovi, Ph.D a Doc. Ing. Antonínu Potěšilovi, CSc. za odborné vedení při řešení práce a za cenné připomínky a podněty při jejich realizaci. Dále Ing. Ladislavu Valovi za technickou i hmotnou podporu a kolegům z modelářského klubu Lány a okolí, výhradně Pavlu Slámovi za zapůjčení modelářských pomůcek a měřicích přístrojů, které pomohly ke zdokonalení této práce.

ABSTRAKT

Při provozu motorových akrobatických modelů letounů se spalovacími nebo elektrickými motory vznikají nežádoucí indukované vibrace, generované samotnými motory a turbulentním prouděním od vrtule. Tyto vibrace zásadně snižují životnost jak draku letounu, tak i všech pohyblivých částí. Veškerá kormidla sloužící pro ovládání letounu jsou ovládána servomotory, u kterých vznikají značné vůle v převodovkách a tím se rapidně zvyšují provozní náklady z důvodů časté výměny těchto dílů. Úkolem této práce je změřit a analyzovat tyto vibrace na modelu letounu o rozpětí 2,6 m poháněném dvoutaktním jednoválcovým benzínovým motorem o obsahu 80 cm³ a dále porovnat rozdíl při pohonu střídavým elektromotorem o výkonu 3150 W. Tento letoun využívá poměrně moderních servomotorů s kovovými nebo titanovými převodovkami.

ABSTRACT

In operation of motorized aerobatic prototype of airplane with combustion or electric engines unwanted induced vibrations are generated. They are generated either by the engines themselves or by turbulent air flow from the propeller. These vibrations considerably shorten life of the airframe and also of all the moving parts. All the steers used for control over an airplane are controlled by servos where considerable steering-gear play is being generated causing the operating costs to increase rapidly because of the need for frequent replacement of these parts. The aim of this thesis is to analyze these vibrations on the model of an airplane with the wing-spread of 2.6 meters propelled by a two-stroke one-cylinder petrol engine with the cylinder volume of 80 cm³ and to compare it with an AC electric drive with the power output of 3150 W. This airplane uses fairly modern servos with the metallic or titanium gearboxes.

Obsah

1	Úvod	9
2	Letoun	11
	2.1 Akrobatický model letounu EDGE 540	.11
	2.2 Zážehový dvoutaktní benzínový motor ZDZ 80RV	.13
	2.3 Vrtule	.14
3	Vibrace rotačních strojů	15
	3.1 Spalovací motor a vibrace	.16
	3.2 Vibrace letecké vrtule	.18
	3.3 Vibrace letounu	.21
	3.4 Snimače pro měření vibrací	.22
	3.4.1 Vysokorychlostni kamera	.22
	3.4.2 Laserový vibrometr	.24
	3.5 Metody vyhodnocování měřených veličín	.25
4	Fyzikalne - mechanicke vlastnosti pryze	28
	4.1 Lahove vlastnosti	.28
	4.2 Miooney – Rivinova rovnice	.29
	4.5 I vidost pruživcii elementu	31
	4.2.2 Tyrdost Shore	22
	4.2.2 Faltom aulivění (ztrdost prvže	22
	4.5.5 Faktory ovirvinujier tvrdost pryze	. 33
5		. 34 27
3	5.1 Měřicí proceviště	27
	5.1 Merici pracoviste	30
6	7ijštění dominantního zdroje vihrací	л <u>л</u>
U	$6.1 \qquad \text{Benzinový motor uložený na pevno}$	4 1
	6.2 Elektromotor uložený na pevno	42
	6.3 Parametry naměřené laserovým vibrometrem	43
7	Benzínový motor uložený pružně	51
	7.1 Prvžové pružné elementy (silentbloky)	.52
	7.1.1 Silentbloky S2025 o tuhosti 55° ShA	.53
	7.1.2 Silentbloky 45NR11 o tuhosti 45° ShA	.60
	7.2 Naměřené parametry pomocí rychlostní kamery	64
	7.2.1 Otáčky 2000 - 2300 ot/min	.64
	7.2.2 Otáčky 3000 ot/min	.65
	7.2.3 Otáčky 6000 ot/min	.65
8	Benzínový motor uložený pružně s pomocí tlumičů bočních kmitů	66
	8.1 Tlumicí členy	.66
	8.1.1 Otáčky 2000 - 2300 ot/min	.68
	8.2 Tlumič výfuku	.69
9	Závěr	71

Zkratky

DFT	diskrétní Fourierova transformace
FFT	rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transform)
FRF	frekvenční charakteristika
MR	Mooney – Rivlinova rovnice
VOP	výšková ocasní plocha

České symboly

A_0	[m ²]	původní průřez zkušebního tělesa
A^{e}	[m ²]	plocha průřezu elementu
b_0	[m]	tloušťka zkušebního tělesa
С	[-]	Cauchyho tenzor napetí
c	[m s ⁻¹]	rychlost šíření světla
C_{1}, C_{2}	[-]	konstanty Mooney - Rivlinovy rovnice
C_k	[-]	koeficient Fourierovy řady
Ck	[-]	koeficient Fourierovy řady
Ε	[Pa]	modul pružnosti v tahu
f	[Hz]	frekvence
F	[N]	síla
G	[Pa]	modul pružnosti ve smyku
g	[m s ⁻²]	tíhové zrychlení
Н	[-]	tvrdost Shore
h	[m]	výška
h_0	[m]	výška po deformaci
Ι	[-]	jednotkový tenzor
<i>I</i> 1, <i>I</i> 2, <i>I</i> 3	[-]	hlavní invarianty tenzoru deformace
j	[-]	imaginární jednotka
k	$[N m^{-1} s]$	koeficient tlumení
k_k	$[N m^{-1} s]$	součinitel kritického tlumení (pro aperiodický útlum)
<i>k</i> _h	[-]	řád harmonické složky
l	[m]	změněná délka zkušebního tělesa po deformaci

<i>l</i> o	[m]	původní délka zkušebního tělesa
lt	[m]	délka zkušebního tělesa při přetržení
т	[kg]	hmotnost
N	[-]	počet bodů transformace
n	$[\min^{-1}]$	počet otáček
Р	[W]	výkon motoru
t	[s]	čas
Т	[s]	perioda vzorkovaného záznamu
v	$[m s^{-1}]$	rychlost
V	[m ³]	objem
V_0	$[m^3]$	původní objem
V_d	$[m^3]$	zdvihový objem válce
W	[J]	deformační energie
$X_{(f)}$	[-]	libovolná funkce frekvence
$x_{(t)}$	[-]	libovolná funkce času
Xo	[m]	dráha pohyblivého objektu
$xp_{(t)}$	[-]	periodická funkce času

Řecké symboly

ε	[1]	poměrné prodloužení
$\mathcal{E}b$	[1]	poměrné zkrácení
\mathcal{E}_t	[1]	tažnost
ν	[-]	Poissonova konstanta
Ω	[rad.s ⁻¹]	vlastní kruhová frekvence
σ	[Pa]	napětí v tahu
φ	[°]	úhel výchylky
λ_x , λ_y , λ_z	[1]	hlavní poměrná přetvoření ve směru os
λ	[m]	vlnová délka
μ	[-]	Poissonovo číslo
π	[-]	Ludolfovo číslo
ω	[rad.s ⁻¹]	úhlová rychlost

1 Úvod

Diplomová práce ukazuje na značný problém v oblasti pohonu leteckých modelů za pomocí spalovacího motoru. Tyto letecké pohonné jednotky jsou vyvíjeny s důrazem na výkon a hmotnost, ale vibrace jsou u nich prakticky neřešenou záležitostí. A právě vibrace způsobují největší opotřebení těchto letounů a to jak opotřebení draků, tak i všech ovládacích mechanismů. Z tohoto důvodu je třeba se pokusit tyto vibrace buď úplně odstranit a nebo aspoň částečně omezit. Tento problém samozřejmě značně zvyšuje složitost konstrukcí těchto strojů a zvyšuje tak i výrobní náklady.

V této práci jsem se rozhodl porovnat také vibrace vytvářené samotným pohybem vrtule, což vytváří turbulentní proudění kolem celého letounu. Tak i vibrace vytvářené elektrickým pohonem, který je už v dnešní době díky výkonným a lehkým lithiovým akumulátorům schopen dosáhnout stejných výkonových a hmotnostních parametrů jako zážehový spalovací motor. Samozřejmě jen pokud uvažujeme dobu provozu v desítkách minut. Navíc tento způsob pohonu vykazuje ve většině technických aplikací mnohem menší vibrace, a jeho náklady na údržbu jsou neporovnatelně nižší. Není také potřeba řešit hlukové limity použitím složitých a drahých tlumičů výfukových plynů, jak je tomu u zážehových motorů. Elektrický motor je totiž konstrukčně několikanásobně tišší.

K omezení přenosu nežádoucích vibrací zážehového motoru dále do trupu letounu je možné použít pružné členy, které jsou schopny částečně utlumit a pohltit nežádoucí vibrace. Tyto pružné členy se vhodně umístí mezi motor a trup letounu, podobně jak je tomu u osobních automobilů mezi motorem a karosérií. U automobilů je ale situace mnohem jednodušší, protože pohonné jednotky jsou od vibrací částečně zproštěny pomocí vyvažovacích hřídelí. Také jejich chod je více plynulý, protože místo jedno a dvouválcových motorů používají čtyř a více válcové motory. A místo dvoutaktních používají čtyřdobé motory s mnohem kultivovanějším chodem. Ty se u pohonných jednotek leteckých modelů z důvodů značného navýšení hmotnosti nepoužívají.

Korektní postup měření rychlosti vibrací by znamenal, provést modální analýzu vibrací celého trupu a řídících ploch:

a) pro vibrace buzené motorem

b) pro vibrace buzené prouděním

c) případně pro harmonické buzení vibrátorem.

Modální analýzu jsme nemohli provést, protože by to překračovalo rozsah DP a na pracovišti školitele (NTI) není systém pro modální analýzu k dispozici. Byli jsme tedy nuceni měřit vibrace v jediném bodě. Ze zkušenosti víme, že k největšímu opotřebení převodovek servomotorů dochází na výškové ocasní ploše (VOP) a zkouškami s rychlostní kamerou se potvrdilo, že při různých režimech vibrací je dominantní mód kmitání VOP ve vertikální ose. Proto stačí měřit v jediném bodě vertikální vibrace VOP.

2 Letoun

Pro tuto práci byl vybrán model letounu EDGE 540 v 33% velikosti od skutečného letounu (obr. 2.2). Tento model byl vyroben autorem této práce pro nácvik letecké akrobacie. Všechny konstrukční prvky letounu byly vyrobeny za pomoci CNC frézy. Díly byly následně sestaveny a slepeny dvousložkovým epoxidovým lepidlem. Jedná se samozřejmě o letuschopný exemplář. K ovládání tohoto modelu slouží 14-kanálová mikroprocesorem řízená RC souprava zobrazená na obr. 2.1.



Obr. 2.1 RC souprava Futaba FX-30

2.1 Akrobatický model letounu EDGE 540

Tento letoun je absolutní špičkou mezi akrobatickými letouny, ať už ve skutečných letounech a nebo jejich modelech. Vyniká nízkou hmotností a velkou plochou křídel, z čehož plyne nízké plošné zatížení. K pohonu modelu letounu slouží výkonný spalovací motor. Model je tvořen klasickou dřevěnou konstrukcí. Kostru trupu letounu tvoří přepážky, které jsou vyrobeny z překližky. Přepážky jsou spojeny nosníky ze smrkového dříví (obr. 2.3) a to vše je potaženo lehkou balzou, která je následně přebroušena a na ní je nažehlena speciální smršťovací fólie. Křídla letounu tvoří žebra, která jsou vyrobena z překližky a ty jsou spojena nosníky ze smrkového dříví a kompozitových materiálů. Podobně jako u trupu letounu je i křídlo potaženo lehkou balzou, která je dále potažena smršťovací fólií.



Obr. 2.2 Akrobatický model letounu EDGE 540

Rozpětí	2,6 m
Délka	2,4 m
Letová hmotnost	12,5 kg
Plocha křídel	134 dm^2
Plošné zatížení	93,35g / dm ²
Motor	ZDZ 80RV
Ovládání modelu	9 servomotorů
Vrtule	dvoulistá JasPropeler o rozměrech 26/10 palců
Palubní napájení	3 x 6,6V lithiové baterie (Li-Fe) o kapacitě 2300mAh

Technické parametry modelu letounu EDGE 540:



Obr. 2.3 Kostra letounu EDGE 540

2.2 Zážehový dvoutaktní benzínový motor ZDZ 80RV

K pohonu modelu letounu EDGE 540 byl použit zážehový benzínový dvoutaktní motor ZDZ 80RV o objemu 80 cm³ (obr. 2.4) s procesorem řízeným zapalováním. Sání motoru je řešeno rotačním šoupátkem, což oproti klasickému membránovému sání přináší jednak přesnější časování a také mnohem delší životnost.



Obr. 2.4 Zážehový dvoutaktní benzínový motor ZDZ 80RV

Zdvihový objem	80 cm^3
Hmotnost	1800 g
Vrtání	52 mm
Zdvih	38 mm
Rozsah otáček	1000-8500 ot/min
Zapalování	Procesorem řízené 4,8-7V
Palivo(směs N95 + olej):	1:35
Doporučené vrtule dvoulisté	24x12, 26x8-10
Doporučené vrtule třílisté	22x12, 23x12, 24x10

Parametry benzínového motoru ZDZ 80RV:

2.3 Vrtule

Použitá vrtule je JasPropeler o rozměrech 26/10 palců, která je vyrobena z bukového dříví. Vrtule byla staticky vyvážena (obr. 2.5), aby se do měření nevnášely vibrace způsobené statickým nevyvážením vrtule.



Obr. 2.5 Vrtule JasPropeler o rozměrech 26/10"

3 Vibrace rotačních strojů

V každém stroji vznikají za provozu síly, které ho rozkmitávají. Vzniká tím zvýšené namáhání stroje a také ztráta energie, která se maří rozkmitáváním základu o velké hmotě. Nepříznivý účinek chvění strojů je často podceňován. Nicméně je potřeba věnovat chvění strojů jistou pozornost. Zkouškami a studiemi bylo dokázáno, že vhodné a správné uložení stroje potlačuje nebo alespoň podstatně omezuje nepříznivý účinek kmitání. Tak se stalo pružné ukládání strojů jednou z důležitých částí techniky.

Z hlediska životnosti je pružné uložení strojů výhodnější než klasické ukládání strojů na pevno. Většina neodborně uložených strojů se ukládá podrezonančně, což má za následek zvýšení rušivých sil přenášených do okolí a rovněž zvýšení dynamických sil ve vlastním stroji. To vede nutně ke zkrácení životnosti stroje, nebo ke zvětšování rozměrů namáhaných součástí.

Při návrhu je nutné respektovat zákony a vztahy plynoucí z teorie kmitání, neboť jenom tak je možné dosáhnout žádoucího výsledku. Hlavní snaha při konstrukci směřuje ke zmenšení rušivých sil a momentů. Proto se stavějí několikaválcové stroje a jejich hřídele se dokonale dynamicky vyvažují. Tyto úpravy možné u některých strojů, jsou však nákladné, a proto se někdy z ekonomického důvodu nedělají v takovém rozsahu, aby rušivé síly byly dokonale odstraněny. Kromě toho je z praxe známo, že i při pečlivém a nákladném vyvažování strojů se nepodaří vždy dokonale odstranit zdroj rušivých sil. Zmenšení jejich přenosu se dosáhne vhodným uložením, aby frekvence vlastního kmitání ve všech směrech a kolem všech hlavních os setrvačnosti byly dostatečně odlišné od frekvence rušivých sil a momentů. Stroj se má ukládat tak, jako by byl v prostoru úplně volný. Je tedy nutné snažit se o uložení na velmi měkkých pružinách. Není-li to z provozních důvodů možné, volí se tvrdší uložení, které je však vždy méně příznivé se zřetelem k přenášení vibrací do okolí. Jsou-li pružiny měkké, přenáší se totiž při téže velikosti amplitudy výchylky menší síla než u tuhých pružin. Proto nelze posuzovat účinnost pružného uložení jen podle velikosti kmitů stroje, ale vždy i podle velikosti síly přenášené pružným uložením do podloží. Přihlédneme-li ke všem okolnostem souvisejícím s ukládáním strojů, můžeme shrnout výhody plynoucí z pružného ukládání takto:

- a) Zmenší se náklady na údržbu
- b) Zmenší se otřesy v okolí stroje
- c) Zvýší se bezpečnost

Existuje mnoho metod výpočtů kmitů. Nicméně při navrhování pružného ukládání strojů s dynamickými účinky nelze postupovat pouze podle konstrukčních zkušeností získaných ze statických výpočtů, neboť často rozhodujícím hlediskem pro vhodnost určité konstrukce jsou dynamické vlastnosti stroje. Zvláště se zvyšující se rychloběžností strojů, rostoucími rozměry a výkony při současném odlehčování konstrukcí vzrůstá důležitost správného návrhu se zřetelem na dynamické působení. K posouzení dynamického chování strojů a základů je vždy nutný výpočet, jehož obtížnost i rozsah záleží na mnoha činitelích, především na složitosti systému, podle teorie o které podrobně pojednává například publikace [1].

3.1 Spalovací motor a vibrace

Pohybující se části vznětového motoru působí určitými silami a momenty na jeho nepohybující se části, kterými se pak dále tyto síly a momenty přenášejí na základ stroje a do jeho okolí. Tyto síly a momenty, zvané budicí, mají u pístových a rotačních strojů obvykle periodický průběh, ale můžou vzniknout i rázové budicí síly. Kromě těchto sil vznikají někdy v motoru síly nepředvídané, to jsou budicí síly nahodilé. Jejich průběh může být buď periodický, nebo rázový. Velikost budicích sil je třeba znát při výpočtu amplitudy kmitů, výpočtu sil a momentů namáhajících jednotlivé části stroje, jakož i sil přenášených do okolí motoru přes motorové lože.

U pístových motorů vznikají budicí síly a momenty v klikovém mechanismu, který převádí posuvný pohyb v pohyb rotační nebo obráceně (obr. 3.1). Klikový mechanismus se skládá z rotující hmoty m_1 a posuvné hmoty m_3 . Obě tyto hmoty jsou spojeny členem o hmotě m_2 , jehož pohyb je složen z obou předchozích pohybů.

Budicí síly od rotujících hmot lze snadno odstranit vyvážením přídavnou hmotou, jejíž odstředivá síla působí v opačném směru. Posuvné síly však nelze dokonale vyvážit. Skládají se z vyšších harmonických složek. I když velikost sil vyšších harmonických složek je obvykle menší než základní složka, je nutno s nimi počítat, poněvadž za určitých okolností mohou velmi nepříznivě ovlivnit vibrační poměry celého motoru.

Kromě sil působících ve směru dráhy pístu vznikají při provozu pístových motorů též síly proměnné velikosti ve směru kolmém na dráhu pístu. Tyto síly vyvolávají klopné momenty. Velikosti sil a momentů pro dvoudobé a čtyřdobé motory se samozřejmě značně liší.



Obr. 3.1 Klikový mechanismus

Rotační stroje mají mít teoreticky klidný chod, při kterém nevznikají žádné vibrace. V praxi však není rozdělení hmoty, rotoru rovnoměrné. Otáčí-li se rotor volně v prostoru, snaží se zaujmout takovou polohu, aby osa rotace splynula s některou jeho hlavní osou setrvačnosti. U rotoru uloženého do ložisek nemusí osa rotace souhlasit s hlavní osou setrvačnosti. Poněvadž se však rotor snaží, aby tyto obě osy splynuly, projeví se tato snaha v zatížení ložisek a s nimi spojených strojních částí periodickými silami. Podle polohy, jakou zaujímá hlavní osa momentu setrvačnosti se zřetelem k ose rotace, rozlišují se tři druhy nevyváženosti:

- Rotor je nevyvážen čistě staticky, jestliže jeho hlavní osa setrvačnosti je rovnoběžná s osou rotace. V tomto případě je těžiště vyoseno o určitou vzdálenost od osy rotace. Při otáčení vznikne odstředivá nevyvážená síla, která způsobí jednostranné zatížení, které musí být zachyceno v ložiskách. Tím se ložiskový držák rozkmitává. Rotor lze samozřejmě vyvážit připojením určitého vývažku.
- 2) Protíná-li hlavní osa momentu setrvačnosti rotoru osu rotace v těžišti, nastane čistá dynamická nevyváženost. Jsou-li v rotoru nevývažky, leží jeho těžiště sice na ose rotace, ale hlavní osa momentu setrvačnosti protíná osu rotace pod určitým úhlem. Při rotaci působí na rotor dvojice odstředivých sil. Tato nevyváženost se odstraní připojením dvou stejně velkých vývažků ve dvou vyvažovacích rovinách, které vyvolají stejnou, ale v opačném smyslu působící dvojici sil.
- 3) Je-li hlavní osa momentu setrvačnosti rotoru mimoběžná k ose rotace, je rotor obecně nevyvážen. Tuto nevyváženost lze pokládat za složenou z nevyváženosti statické a čistě dynamické. Obecná nevyváženost tuhého rotoru se odstraní přidáním dvou nevývažků ve dvou libovolných rovinách kolmých na osu rotace.

Velikost nevývažků a jejich polohu ve vyvažovacích rovinách nutno přesně určit. Nevyváženost rotoru vyvolá v ložiskách chvění. Měřením se zjistí amplituda výchylky a její fázové posunutí vzhledem k určitému místu na rotoru.

U pružných rotorů se vyvažuje v několika vyvažovacích rovinách a k vyvážení se používá skupiny vývažků. Úplné vyvážení rotorů není prakticky možné, takže u rotačních strojů i po vyvážení vznikají rušivé budicí síly. Jejich velikost je dána zbytkovým nevývažkem.

3.2 Vibrace letecké vrtule

Dalším značným problémem i za předpokladu úplného vyvážení motoru, je problém s rušivými silami vznikajícími pohybem vrtule. U vrtule taky není prakticky možné zajistit úplné vyvážení. Statické vyvážení je možné zajistit na vysoké úrovni, ale dynamické vyvážení není možné z důvodu různého rozložení hustoty materiálu, ze kterého jsou jednotlivé listy vyrobeny. Zároveň je potřeba si představit, že na vrtuli při jejích průměrných otáčkách za běhu okolo 5000-8000 ot/min ulpí určité množství nečistot za letu, ať už je to hmyz nebo tráva. Z čehož vyplývá, že během letu dochází k určitému statickému i dynamickému rozvážení vrtule, a z toho plynoucí vibrace jsou přenášené přes lože motoru do trupu letounu a dále na kormidla tohoto stroje. Je pochopitelné, že tyto vibrace se mohou postupně na jejich cestě trupem letounu utlumovat, ale mohou také interferovat s rázy a vibracemi generovanými samotným spalovacím motorem.

Tyto síly dosahují obvykle značné velikosti, a proto je nutné zmenšit jejich přenos do trupu letounu pružným uložením hnacího agregátu. Rázy obvykle vznikají tím, že padající těleso $m_k z$ výšky h_0 narazí na těleso m (obr. 2.2). Výška h představuje výšku, které po nárazu těleso opět dosáhne. V určitých případech lze dobu trvání rázu t_r zanedbat vůči periodě kmitu tělesa m. K výpočtu pružného uložení je třeba znát rychlost hmoty m způsobenou vlivem rázové budicí síly.



Obr. 2.2 Klikový mechanismus

Pokud známe časový průběh rázové síly F = x(t) a je-li možné předpokládat s ohledem k malé hmotě t_r , že hmota m je volná v prostoru, je konečná rychlost hmoty m dána vztahem

$$v_1 = \frac{S}{m},\tag{3.1}$$

kde S je impuls síly. Jeho velikost se vypočte ze vztahu

$$S = \int_0^{tr} F \, dt \,. \tag{3.2}$$

Pokud není znám časový průběh rázové síly, je možné stanovit rychlost z věty o zachování hybnosti obou na sebe narážejících hmot

$$m_k v_k = m v_1 + m_k v_{k1}. ag{3.3}$$

Pokud padá hmota m_k na hmotu m, která je v klidu (v = 0), z výšky h_0 , dopadne na ni rychlostí

$$v_k = \sqrt{2 g h_0} \,, \tag{3.4}$$

a poté se začne hmota m pohybovat rychlostí v_1 . Hmota m_k se pohybuje po rázu rychlostí v_{k1} . Rozdíl rychlostí obou hmot po rázu je roven hodnotě $\mathcal{E} v_k$ kde \mathcal{E} je tzv. součinitel restituce. Rychlost hmoty m po rázu je pak dána vztahem

$$v_1 = \frac{m_k}{m + m_k} v_k (1 + \varepsilon). \tag{3.5}$$

U strojů se většinou udává energie rázu E_r . Na jejím základě je možné vypočítat rychlost v_k ze vztahu

$$v_k = \sqrt{2 \, \frac{E_r}{m_k}} \,. \tag{3.6}$$

Součinitel restituce $\boldsymbol{\varepsilon}$ viz (3.5) lze stanovit ze známé výšky \boldsymbol{h} , které po nárazu opět dosáhne hmota \boldsymbol{m}_k

$$\varepsilon = \frac{m_k}{m} \left(1 - \sqrt{\frac{h}{h_0}} \right) - \sqrt{\frac{h}{h_0}} \,. \tag{3.7}$$

Dále je potřeba vzít v úvahu rázy generované samotným letem v turbulentním prostředí. Ty ale nedosahují vysokých hodnot, řádově u slabé turbulence se udává 0,5 - 1,5 násobků přetížení (dále jen G). U silné turbulence přetížení dosahuje maximálně 3,5 G, ale takto silná turbulence je většinou jen krátkodobá a není brána jako limitující faktor, podrobně o ní pojednává autor v publikaci [6]. Nicméně akrobatický letoun je konstruován až do hodnot ± 15 G a to je právě klíčová hodnota, kterou musí splňovat jakákoliv část letounu. Není tedy potřeba dále rozvádět úvahy o turbulenci při letu v okolním prostředí a proto se jimi nebudeme dále zabývat. Něco jiného je turbulentní proudění vznikající točivým pohybem vrtule, které bude dále rozebráno.

3.3 Vibrace letounu

K posouzení pružného uložení a k zajištění jeho správné funkce je třeba zjistit kmitání pohonné jednotky a samotného letounu. Porovnáním kmitání motoru a trupu, na kterém spočívají pružné elementy, lze pomocí tuhostí usuzovat na velikost síly, resp. momentu přenášeného z pohonné jednotky do samotného letounu. Dalším porovnáním přenášených sil se silami budicími lze potom určit účinnost pružného uložení. Z účinnosti se pak usoudí, zda pružné uložení splňuje všechny požadavky na něj kladené.

Měřením kmitání různých částí letounu lze zjistit, zda je pružně uložená pohonná jednotka uložena správně v trupu letounu. Dále lze určit, zda některé části letounu nejsou v rezonanci s frekvencí budicích sil. Jsou-li určité části pohonné jednotky v rezonanci, určí se, do jaké míry ovlivňují kmitání celého letounu. Přípustnost jejich kmitů se pak dále posoudí.

Z charakteru kmitání lze určit závady pružného uložení a často i závady v pohonné jednotce. Závady mechanického rázu se u pružně uložené pohonné jednotky projeví intenzivnějším kmitáním než u pohonné jednotky uložené pevně. Výhodou pružně uložených pohonných jednotek je tedy mimo jiné i to, že lze velikosti kmitání určit snadněji závady samotné pohonné jednotky. Kmitání se obvykle měří při normálním provozu pohonné jednotky a nebo také při rozbíhání a dobíhání, je-li třeba zjistit, jak daleko leží rezonanční frekvence od frekvence provozní. V některých případech však nestačí měřit kmitání vznikající pouze budicími silami a momenty v motoru. Počet otáček motoru nelze někdy plynule měnit a doba rozběhu a doběhu pohonné jednotky je příliš krátká k měření. V jiném případě není známa velikost budicí síly, a nebo potřebujeme zjistit, jak by se chovala pohonná jednotka při působení určité budicí síly v jednom směru a nebo momentu kolem určité osy. V těchto případech se k rozkmitání pohonné jednotky používá vibrátorů (budičů kmitů).

Kmitání pohonné jednotky se nedoporučuje odhadovat a posuzovat subjektivně. Jeho velikost a škodlivost se buď podceňuje (zvlášť při vyšších frekvencích a kmitech složených z několika harmonických složek), a nebo naopak se zbytečně přeceňuje vlivem akustických efektů, které obvykle chvění provázejí.

Intenzitu kmitání lze měřit v různých jednotkách. Nejčastěji se však zjišťuje amplituda výchylky, rychlosti a zrychlení. K měření se používá přístrojů, které lze zhruba rozdělit do tří skupin:

- 1) Mechanické přístroje
- 2) Optické přístroje
- 3) Elektrické přístroje

3.4 Snímače pro měření vibrací

Značným problémem bylo, jakým způsobem vibrace na draku letounu měřit. Kostra letounu je vyrobena z překližky. Nosníky jsou vyrobeny ze smrkového dříví (viz obr. 2.3) a to vše je potaženo lehkou balzou, která je následně přebroušena a na ní je nažehlena speciální smršťovací fólie (viz kapitola 2). Bylo by velmi obtížné připevnit na fólii akcelerometry, protože jejich hmotnost, i když velmi malá (řádově v jednotkách až desítkách gramů), by přece jenom přesahovala hmotnost potahu letounu, což by do měření vnášelo značné chyby. Lepený spoj pomocí vosku nepřicházel v úvahu, protože velikost vibrací je tak vysoká, že by došlo okamžitě k jejich oddělení od potahu letounu. Lepený spoj za pomocí lepidla, také nebylo možné využít protože by došlo při jeho následném oddělování při ukončení měření k zničení potahu. Šroubový spoj také nepřicházel v úvahu, protože by došlo k poškození letounu a vzhledem k tomu že se jedná o letuschopný exemplář, který má být dále použitelný je tato možnost nepoužitelná. Proto jsme se rozhodli použít laserový vibrometr a měřit vibrace na potahu letounu za pomocí laserového paprsku. Také byla použita pro měření rychlostní kamera, pro možnost vizuálního zkoumání pohybu pohonné jednotky a výškové ocasní plochy (VOP).

3.4.1 Vysokorychlostní kamera

Vysokorychlostní (rychlostní) kamera je přenosné optoelektronické zařízení pro vytváření obrazového záznamu velmi vysokou frekvencí snímání. Soudobé moderní vysokorychlostní kamery jsou buď digitální nebo analogové. Nejvíce používané jsou pak digitální, u kterých vychází záznam několikanásobně levněji než u analogových kamer. Poskytují tedy digitalizovaný záznam obrazu, někdy i zvuku. Rychlostní kamery mohou být jak barevné, tak černobílé. Černobílý záznam může být u rychlostních kamer za určitých okolností výhodnější s ohledem na menší objem zpracovávaných a přenášených dat. Často není potřeba při měření rozlišovat barvy. Rychlostní kamery se od běžných digitálních kamer liší i svým vzhledem. K nastavení parametrů záznamu a ovládání kamery slouží externí zařízení, nejčastěji řídící panely nebo PC. V současné době jsou v celosvětovém měřítku používány především vysokorychlostní kamery firem Olympus a Redlake.

Ve světě kolem nás existuje mnoho rychlostních produktů, jevů a činností. Mezi rychlostní kamerou a obyčejnou kamerou je rozdíl v rychlosti (frekvenci) snímání propastný. Zatímco běžná kamera snímá standardní rychlostí 25 obrázků za sekundu, u rychlostní

kamery jsou běžné frekvence od tisíce snímků za sekundu až po statisíce snímků za sekundu, tedy o 2 až 4 řády vyšší. Vysoká frekvence snímání však vyžaduje zpracování obrovského množství dat. Například při dnes běžné snímkovací frekvenci 20 000 fps (frames per second - snímků za sekundu) a rozlišení dílčích snímků obrazového záznamu 250 x 200 bodů je třeba uložit za sekundu 1GB dat. Nicméně moderní špičkové rychlostní kamery jsou schopny při frekvenci snímání 30 000 fps rozlišení až 1024 x 768 bodů. To znamená, že na jeden DVD disk je možné uložit za výše uvedených podmínek pouze necelou sekundu nekomprimovaného černobílého záznamu v reálném čase. Je také potřeba tento záznam ukládat v reálném čase do interní paměti v kameře, k čemuž slouží velice rychlé paměti, které jsou samozřejmě drahé.

Výraznou předností digitálního záznamu je, že je použitelný nejen ke kvalitativní analýze zobrazeného děje nebo jevu, ale umožňuje i analýzu kvantitativní, tj. hodnocení s využitím aktuálních hodnot fyzikálních veličin. Vzhledem k tomu, že k jednotlivým obrázkům záznamu lze přiřadit reálný relativní čas, je možné porovnáním sousedních obrázků stanovit vektory rychlosti a zrychlení pohybujících se prvků, rychlosti změny tvaru těles či vizuálních projevů zkoumaných jevů apod. Výhodou je také okamžité zobrazení naměřených dat v PC, které se dají ihned zpracovávat. Přesnost takto stanovených hodnot analyzovaných veličin je ovlivněna především rozlišením (kvalitou) záznamu, dále bitovou hloubkou záznamu, metodou kvantifikace dat a kvalitou použité optické soustavy (objektivu), která je zatížena vadami zobrazení (distorze, astigmatismus apod.). Pokud jsou použité objektivy kvalitní, vady jsou zanedbatelné. Pro přesná měření se používají speciálně kalibrované objektivy. Nezanedbatelnou roli hraje i správné zaostření objektivu na snímaný objekt po celou dobu trvání záznamu, zejména při snímání pohybujícího se tělesa.

Digitální záznam lze navíc ihned po jeho provedení prohlédnout na externím monitoru, posoudit, zda je zdařilý a v případě neúspěchu jej opakovat (je-li to ovšem možné). Určitým problémem je závislost rozlišení obrazového záznamu na frekvenci snímkování, která vyplývá z omezené rychlosti datových toků ze záznamových čipů na paměťové médium. To v praxi znamená, že při nejvyšších rychlostech snímání je rozlišení záznamu tak nízké, že je obraz pro měřené aplikace nepoužitelný.

Velkým problémem při použití rychlostní kamery je dostatečné osvětlení snímané scény. Při použití současných kamer snímajících s frekvencí řádově v desítkách tisíc obrázků za sekundu může být (z pohledu kamery) i na přímém poledním slunci šero či dokonce tma. Vysoké frekvence snímání proto vyžadují použití velmi výkonného osvětlení scény. Používají se halogenová, nebo výbojková svítidla o příkonu několika kilowattů.

Problém těchto osvětlovacích prvků je vyzařování značného tepla. Pokud použijeme velmi výkonnou osvětlovací lampu v řádech kilowatů, bude docházet ke značnému vyzařování tepla do jejího okolí, což může poškodit jak kameru tak samotný objekt, který snímáme. Může tím samozřejmě docházet i ke značnému ovlivnění měření.

Proto bylo při měření využito výbojkové lampy se světlovodivým kabelem, tzv. studené světlo. Byla použita rychlostní kamera *Olympus i-Speed 2*, v závislosti na potřebách měření byla s kamerou prováděna měření od 500 do 2000 snímků za sekundu.

Síťový vstup	Lemo EGG.OB.304.CLV
Snímkovací frekvence	1000 fps při plném rozlišení
	800 x 600 pixelů, maximální 2000 fps
Maximální rozlišení	800 x 600 pixelů
Barva záznamu	Černobílá
Vstupní napětí	12V, ± 10 %
Příkon systém	Max. 36 W
Montáž pro příslušenství	4 otvory v základně, Whitworthův závit ¹ /4"
Rozměry a hmotnost	264 × 106 × 98 mm, 2 kg

Základní parametry rychlostní kamery Olympus i-Speed 2:

3.4.2 Laserový vibrometr

K měření rychlosti kmitání byl použit laserový vibrometr *Ometron VH-1000-D*, používající helium neonový (He - Ne) laser. Tento laser vyzařuje paprsek červeného viditelného světla s vlnovou délkou $\lambda = 633 \text{ nm}$. Vibrometr užívá Dopplerova principu: Kmitočet *f*, přijímaný pevným pozorovatelem z přibližujícího se zdroje rychlostí *v* se zvyšuje na $f + \Delta f$, resp. se vzdalujícího zdroje se pak obdobně snižuje, zde platí rovnice

$$f + \Delta f = \frac{c}{\lambda - \Delta \lambda} = c \left(\frac{c}{f} - \frac{v}{f}\right)^{-1} = \frac{c}{c - v} f.$$
(3.8)

Využití tohoto principu tedy umožní měřit rychlost pohybu objektu v ose laserového paprsku. Pro měření laserovým vibrometrem bylo nutné měnit jeho polohu, aby bylo možné

měřit na více místech, a vibrometr bylo možné nasměrovat na rovinnou plochu trupu letounu. Vibrometr byl upevněný na stativu mimo upevňovací stůl na podlaze laboratoře, z důvodu zamezení veškerého přenosu vibrací z letounu na přístroj. To bylo samozřejmě ověřeno a bylo zjištěno, že přístroj musí být vzdálen také od proudícího vzduchu kolem letounu, ten je také schopen poměrně značným způsobem ovlivňovat výsledky měření. Je tudíž možné konstatovat, že ani při nejvyšších otáčkách se na něj nepřenášely žádné patrné vibrace z modelu letounu.

Kmitočtový rozsah	0.5Hz22kHz
Max. rozsah vibrací	20 mm/s, 100 mm/s, 500 mm/s
Odstup signálu od šumu (SNR)	90dB
Šum	0.02 μm/s
Pracovní vzdálenost	do 20m dle povrchu měřené plochy
Laser	Třída II
Výstupní signály	Analogová rychlost (±5 V, 50 W, TTL)
Rozměry a hmotnost	240 × 58 × 86 mm, 5 kg

Základní parametry laserového vibrometru Ometron VH-1000-D:

3.5 Metody vyhodnocování měřených veličin

Při analýze naměřených dat byla používána pro přechod z časové do frekvenční oblasti diskrétní Fourierova transformace. Pro spojité funkce je přímá a zpětná Fourierova transformace definována předpisem

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \, e^{-j2\pi f t} \, dt \,, \qquad \qquad x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \, e^{j2\pi f t} \, df. \tag{3.9}$$

V těchto vztazích je označen originál x(t) a obraz X(f). Uvedené základní vztahy umožňují u spojitých funkcí přecházet z časové oblasti {*t*} do frekvenční oblasti {*f*} přímým i opačným směrem. Fourierovým obrazem reálné funkce x(t) je komplexní funkce $X{f}$. Tento obraz se vyjadřuje také ve složkovém nebo polárním tvaru komplexního čísla. Při měření charakteristických veličin mechanických systémů se často analogový signál (výstupní napětí snímače) vzorkuje určitou frekvencí pro zaznamenání hodnot tohoto signálu ve sběrném zařízení. Takto se stane z původně analogové funkce měřené veličiny diskrétní funkce. Vyjádřeno formálně je

$$x(t) \cong x(n \cdot \Delta t), \quad X(f) \cong X(k \cdot \Delta f), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N,$$

kde Δt je časový krok ($\Delta t = t_{max}/N$, kde t_{max} je celkový uvažovaný čas a N je celkový počet vzorků), Δf pak je obdobně krok frekvenční ($\Delta f = 1/t_{max}$). Výchozí transformační vztahy (3.9) lze pak vyjádřit sumací

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \ e^{-j2\pi k n/N} , \qquad x(n) = \sum_{n=0}^{N-1} X(k) \ e^{j2\pi k n/N} . \qquad (3.10)$$

Fourierova transformace spojité periodické funkce $x_p(t)$ je náhrada periodické funkce součtem spočetné množiny harmonických funkcí. V komplexním tvaru je dána předpisem

$$x_p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_k \, e^{jk\omega_0 t} , \qquad c_k = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} x_p(t) \, e^{-jk\omega_0 t} , \qquad (3.11)$$

kde $\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{T_0}$.

Je-li funkce $x_p(t)$ vzorkovaná frekvencí $f_{vz}=1/T$ s *N* vzorky na periodu (čili *N*.*T*=*T* θ) lze výraz pro výpočet koeficientů řady *ck*, viz (3.11) přibližně nahradit vztahem

$$c_k \doteq \frac{T}{NT} \sum_{n=0}^{N-1} x_p(nT) \, e^{-j\omega_0 knT}, \qquad c_k \doteq \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_p(nT) \, e^{-j2\pi kn/N}, \qquad (3.12)$$

kde se využilo, že je $\omega_0 T = 2\pi f_0 T = \frac{2\pi T}{T_0} = \frac{2\pi}{N}$. Pro porovnání koeficientů Fourierovy řady *ck* s hodnotami Fourierovy transformace *X(k)* je možné použít přibližný vztah

$$c_k \doteq \frac{1}{N} X(k). \tag{3.13}$$

Tento vztah je přibližný, protože náhrada rovnice (3.11) rovnicí (3.12) je přibližná, jde o náhradu $x_p(t)$ schodovitou funkcí pro integraci. Chyba této náhrady závisí na průběhu signálu a zmenšuje se s růstem N a poklesem T. Doba potřebná pro výpočet diskrétní Fourierovy transformace (DFT) je přibližně úměrná N^2 , proto byly vypracovány efektivní algoritmy rychlé Fourierovy transformace (FFT). Nejrozšířenější algoritmy vyžadují pro výpočet diskrétní Fourierovy transformace (DFT) byl použit výpočetní systém Matlab, který používá algoritmus "rychlé Fourierovy transformace" (FFT). Při nedodržení podmínky $N=2^m$ může dojít k podstatným rozdílům ve výsledcích.

4 Fyzikálně - mechanické vlastnosti pryže

K utlumení vibrací způsobených motorem se používá pružných a tlumicích elementů, zejména silentbloků a tlumičů. Proto je v dalších kapitole rozebráno, jakým způsobem se elastické (případně viskoelastické) vlastnosti pryží kvantifikují a měří.

4.1 Tahové vlastnosti

Tahová zkouška je jednou z prvních zkoušek, podle které se hodnotí elastické vlastnosti a pevnost materiálu. Na zkušební těleso působí stále se zvětšující síly, až dojde po určité deformaci k přetržení – destrukci materiálu. Pevnost v tahu je vyjádřená silou, vztaženou na jednotkový průřez – tedy napětím potřebným k přetržení hmoty. Zavedením dokonalých systémů snímání napětí a deformace a jejich grafickým záznamem jsou získávány pracovní diagramy, kde celá tahová křivka poskytuje širší a přesnější informaci o deformačním chování materiálu za různých podmínek zkoušení.

Deformaci tahem můžeme znázornit na hranolu v pravoúhlých souřadnicích, jehož původní průřez A_{θ} je dán součinem šířky a výšky

$$A_0 = b_0 \ h_0 \,. \tag{4.1}$$

Působí-li na plochu A_{θ} při jednosměrném tahu síla F, vzniká v tělese tahové napětí

$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \qquad (4.2)$$

hranol se začne deformovat a s tím i měnit původní rozměry. Při dosažení meze pevnosti materiálu dochází k přetržení tělesa. S prodloužením tělesa se mění jeho původní délka l_{θ} na délku l a tuto délkovou změnu definujeme jako poměrné (relativní) prodloužení

$$\mathcal{E} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \,. \tag{4.3}$$

Zmenšení průřezu obdobně vyjadřujeme poměrným zkrácením základny nebo výšky hranolu

$$\mathcal{E}_b = \frac{\Delta b}{b_0} \,, \tag{4.4}$$

vztah mezi poměrným zkrácením a poměrným prodloužením je tzv. Poissonovo číslo

$$v = \frac{|\mathcal{E}_b|}{\mathcal{E}}, \tag{4.5}$$

které charakterizuje do určité míry změnu objemu zkoušeného materiálu vzhledem k jeho protažení. Změna objemu je dána vztahem

$$\frac{\Delta V}{V_0} \approx (1 - 2\nu) \frac{\Delta l}{l_0} \,, \tag{4.6}$$

kde v může dosáhnout v případě, že se objem nemění, největší hodnoty 0,5. Většinou se průřez zmenšuje méně než by odpovídalo protažení, objem vzrůstá a hodnoty jsou pak menší než 0,5. Elastomery – např., přírodní kaučuk – nemění až do šestinásobného protažení objem – jsou nestlačitelné, mají v = 0,500.

Z hlediska deformačního chování nás především zajímá změna délky zkoušeného tělesa během namáhání až do jeho přetržení. Zavádí se pojem protažení. Poměrná deformace se vyjadřuje zlomkem ($\Delta l/l_0$), protažení se označuje \mathcal{E}_t a je vyjádřeno vztahem (4.3). Podobně jako mezní hodnota deformace – protažení při přetržení – krátce označována jako tažnost, je důležitou fyzikální veličinou z hlediska konstrukčních vlastností polymerů, kde l_t je délka tělíska při přetržení.

4.2 Mooney – Rivlinova rovnice

K výpočtu deformační energie pružných elementů se využívá Mooney – Rivlinova rovnice (MR). Z fenomenologické teorie pro deformační energii izotropních těles, viz literatura [7], platí vztah (4.7), kde W je deformační energie

$$W = C_1 (I_1 - 3) + C_2 (I_2 - 3), \qquad (4.7)$$

kde $-I_1, I_2$ jsou tzv. invarianty deformace $-\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ jsou hlavní poměrná přetvoření ve směru os a platí pro ně

$$I_{1} = \lambda_{x}^{2} + \lambda_{y}^{2} + \lambda_{z}^{2}, \qquad (4.8)$$

$$1 \quad 1 \quad 1$$

$$I_{2} = \frac{1}{\lambda_{x}^{2}} + \frac{1}{\lambda_{y}^{2}} + \frac{1}{\lambda_{z}^{2}}, \qquad (4.9)$$

a C_1 , C_2 jsou nastavitelné parametry, které se stanoví porovnáním experimentu a uvedenou funkcí. Faktor 3 v rovnici (4.7) zaručuje, že W nedeformovaného tělesa je nulové. Dosazením rovnic (4.8 *a* 4.9) do rovnice (4.7) pak získáme

$$W = C_1 \left(\lambda_x^2 + \frac{2}{\lambda_x} - 3 \right) + C_2 \left(\frac{1}{\lambda_x^2} + 2\lambda_x - 3 \right), \tag{4.10}$$

za předpokladu, že

$$\lambda_y = \lambda_z = \frac{1}{\lambda_x^{1/2}},\tag{4.11}$$

derivací a dosazením poměrné délky α za poměrnou deformaci λ a následnou úpravou rovnice (4.9) pak získáme Mooney-Rivlinovu (MR) rovnici

$$\frac{F}{A_0} = C_1 \left(\alpha - \alpha^{-2} \right) + C_2 \left(1 - \alpha^{-3} \right), \tag{4.12}$$

Rovnice MR je schopná popsat tahové křivky všech kaučukovitých sítí velmi dobře až k inflexnímu bodu. Parametry C_1 , C_2 se vyhodnotí z experimentálních údajů, jestliže se data zpracují ve smyslu linearizovaného tvaru rovnice (4.12)

$$\frac{F}{2A_0(\alpha - \alpha^{-2})} = C_1 + C_2 \frac{1}{\alpha}.$$
(4.13)

Hodnoty funkce na levé straně rovnice se vynesou proti $1/\alpha$ a závislosti se proloží přímkou, která vytíná na ose pořadnic úsek C_1 , její směrnice je C_2 . Nalezené hodnoty C_1 vzrůstají u daného polymeru monotónně se stupněm zesíťování. Veličina C_2 nejprve roste, avšak v oblasti běžných stupňů zesíťování se přiblíží limitní hodnotě viz vztah (4.3).



Obr. 4.1 Popis tahové křivky pro pryž pomocí Mooney-Rivlinovy (MR) rovnice (převzato z [11])

Mooney-Rivlinova rovnice výborně popisuje tahovou křivku elastického materiálu po inflexní bod, jak schématicky znázorňuje obr. 4.1.

4.3 Tvrdost pružných elementů

Obecně je tvrdost fyzikální pojem pro odpor materiálu, kterým se brání proti vniknutí jiného, tvrdšího tělesa. Tedy vlastnosti spíše povrchu materiálu. Polymerní materiály jsou houževnaté, v případě pryže i pružné, jejich povrchy se více nebo méně deformují. Tvrdostní zkoušky se proto vyvinuly v měření odporu celého objemu proti vtlačování tvrdých těles definovaných tvarů. Při měření tvrdosti kovů, které jsou plastické, se vyhodnocuje tvrdost podle velikosti stopy, kterou čidlo na povrchu zanechalo. Vzhledem k viskoelastickému chování polymerů nelze u nich měřit stopu, ale rovnovážnou hloubku vniknutí čidla při určité konstantní síle vtlačování.

Při odporu celého obejmu je tvrdost vyjádřením tuhosti a u některých metod jsou dosahovány dobré korelace mezi tvrdostí a modulem pružnosti. Protože pryž má značně nižší modul a rozdílné deformační vlastnosti, jsou konstruovány zvlášť přístroje na stanovení tvrdosti pryže (obr. 4.2) a jiné pro měření tuhých sklovitých polymerů.

Podle tvaru čidla se ustálily následující metody měření tvrdosti:

- 1. kuličkou nebo tyčkou s kulovým zakončením
- 2. kuželem nebo jehlanem
- 3. komolým kuželem

Při posuzování určitých hodnot tvrdosti různými metodami je třeba si uvědomit, že hodnoty tvrdosti jsou naměřená a srovnatelná čísla pro zcela určité přístroje a smluvní postupy.



Obr. 4.2 Univerzální tvrdoměr DIGI - Test II (převzato z [9])

4.3.1 Tvrdost DVM

Pro velmi měkké materiály, např. PVC - plastigely nebo velmi měkkou pryž, se používá měření tvrdosti podle DVM. Vznikla úpravou Martensova kuličkového tvrdoměru, který používal pro měření pryže konstantním zatížením 100 g na kuličku o průměru 5 mm. Dalším vývojem vznikl tvrdoměr s průměrem kuličky 100 mm a zatížením 1000 g. Číslo tvrdosti se odečítá přímo v setinách mm hloubky vtisku, která se zjišťuje pomocí výškového indikátoru. Hloubka vtisku se odečítá po 10 vteřinách a čím je pryž měkčí, tím větší číslo dostaneme. Hlavní součástí přístroje je citlivý výškový ukazatel se stupnicí dělenou od 0-2 mm po 0,01 mm dílcích. Zkušební tělesa mají mít hladký povrch s minimální tloušťkou 6 mm a měření se provádí minimálně 10 mm od okrajů zkušebního tělesa. Postupuje se tak, že se přitlačí kulička na povrch tělesa, kde působí předtížení 50 g dané váhou tyčinky a kuličky. Ukazatel musí být na nule. Páčkou se vzorek plně zatíží a po 10 vteřinách se odečte hodnota tvrdosti.

4.3.2 Tvrdost Shore

Přístrojů na měření tvrdosti Shore je celá řada pro různé rozsahy. Dnes se používají typy A, C a D. Zkoušky jsou založeny na měření odporu proti vtlačování ocelových hrotů různých tvarů. I když má Shore A stupnici 0-100, stanovuje se tvrdost pryže v rozsahu 30 až 85 jednotek Shore A. Pro měkčí vulkanizáty je lépe používat metodu DVM, pro tvrdší pak Shore D. Typické pro tyto typy tvrdoměru je zatěžování pomocí pružin, které je nutno před měřením kontrolovat a pomocí cejchovacího péra vynulovat.

Při měření tvrdosti Shore A se postupuje tak, že se tvrdoměr přiloží na zkušební těleso (minimální tloušťky 6 mm, nejméně 12 mm od okraje, při více měřeních nejméně 5 mm od sebe) tak, aby patka pevně přisedla po celé ploše. Tvrdost se odečítá za 3 vteřiny od okamžiku dotyku, mění-li se hodnota na stupnici i dále, pak se odečte tvrdost za 15 vteřin. Výsledná hodnota tvrdosti je aritmetický průměr nejméně tří měření, povolená odchylka od průměru nesmí být větší než \pm 5 %.



Obr. 5.1 Zkušební hrot tvrdoměru typu A a D (převzato z [11])

4.3.3 Faktory ovlivňující tvrdost pryže

Hodnota tvrdosti pryže se velmi často předepisuje. Dosáhnout jí při zachování ostatních požadovaných vlastností není vždy snadné, stejně jako není snadné udržet ji vždy během provozu v požadovaných tolerancích, a to proto, že závisí do jisté míry i na podmínkách zpracování.

Tvrdost pryže lze upravovat:

- a) typem plniva a plněním
- b) dávkováním síry
- c) urychlením
- d) změkčovadly

V malých mezích se mění tvrdost i způsobem vulkanizace. Největší vliv na hodnotu tvrdosti má plnivo a jeho dávkování. Plněním lze obtížně dosáhnout tvrdosti větších než 85°ShA. Zvětšováním dávek síry lze upravovat tvrdost ve značném rozsahu až do hodnot tvrdé pryže. Podle obsahu vázané síry v hmotnostních dílech na 100 hmotnostních dílů kaučuku (dsk) se rozlišuje pryž měkká (asi do 4 dsk síry), polotvrdá (12-25 dsk síry) a tvrdá (ebonit) s obsahem síry 25-50 dsk. Protože se tím však mění některé jiné vlastnosti, např. strukturní pevnost, stárnutí, není možno se od dávkování obvyklého pro měkkou pryž příliš odchýlit a tohoto způsobu se u měkké pryže ke změně tvrdosti ve větším rozsahu nepoužívá. Tvrdost značně závisí na stupni vulkanizace.

Mezi tvrdostí pryže a Youngovým modulem existuje určitá, i když omezená korelace. Pro pryže z přírodního kaučuku byla navržena závislost podle rovnice

$$E = 3G = 3,57 \exp(0,033H) , \qquad (4.14)$$

kde *H* je tvrdost Shore.

4.4 Tlumicí členy

Při pružném ukládání pohonných jednotek je možné použít i tlumicí elementy (tlumiče). Tlumením se sice zmenšuje amplituda vibrací pohonné jednotky v oblasti rezonancí, ale na druhé straně se opět zvyšuje velikost přenášené síly na trup letounu. Ve většině případů pružného uložení stačí vnitřní tlumení pružin, na nichž je těleso uloženo, a proto se pružiny volí též se zřetelem na jejich tlumicí vlastnosti. Většinou se počítá s poměrným útlumem, který je vyjádřen vztahem

$$k_p = \frac{k}{k_k} = \frac{k}{2m\Omega},\tag{4.15}$$

kde k – koeficient tlumení (N m⁻¹ s),

...

- k_k součinitel kritického tlumení (pro aperiodický útlum),
- *m* velikost uložené hmoty (u soustavy s jedním stupněm volnosti) (kg).
- $\boldsymbol{\Omega}$ vlastní kruhová frekvence soustavy (s⁻¹)

Tlumení pružin se obvykle nepočítá, ale stanoví se experimentálně při volném kmitání pružně uložené hmoty (jeden stupeň volnosti). Změří se velikost dvou po sobě jdoucích amplitud výchylky y_1 a y_2 ($y_1 > y_2$) a poměrný útlum se pak vypočte pomocí logaritmického dekrementu ze vztahu

$$\frac{k}{k_k} = \frac{\ln \frac{y_1}{y_2}}{\sqrt{\left(\ln \frac{y_1}{y_2}\right)^2 + (2\pi)^2}}.$$
(4.16)

Pro pružiny s malým tlumením lze s dostatečnou přesností počítat ze zjednodušeného vzorce

$$\frac{k}{k_k} = \frac{\ln \frac{y_1}{y_2}}{2\pi}.$$
(4.17)

Je-li amplituda výchylky při rezonanci příliš velká a dostatečného tlumení nelze dosáhnout volbou vhodných pružin, lze použít tlumičů.



Obr. 4.3 Nákres tlumiče v řezu

Často se využívá hydraulických tlumičů. Pro nejjednodušší typ tlumiče, kde se píst pohybuje ve válci naplněném kapalinou podle obr. 4.3 platí, že kapalina stlačovaná pístem o průměru **D**

proudí na jeho druhou stranu otvorem o průměru d. Je-li rozdíl tlaků nad pístem a pod ním Δp , je síla působící na píst dána vztahem

$$P = \frac{\pi D^2}{4} \Delta p \quad . \tag{4.18}$$

Posune-li se píst o element dráhy dx, musí přepouštěcím otvorem protéct kapalina o objemu

$$d0 = \frac{\pi D^2}{4} \, dx \,. \tag{4.19}$$

Podle Poissonova zákona je objemové množství kapaliny proteklé otvorem o průměru *d* za čas *dt* dáno vztahem

$$d0 = \frac{\pi d^4}{128 \eta l} \,\Delta p \,dt \,, \tag{4.20}$$

kde η – viskozita kapaliny (N m⁻² s) l – délka otvoru (cm) Δp – rozdíl tlaků nad pístem a pod ním (N m⁻²)

Porovnáním rovnic (4.19) a (4.20) a dosazením za Δp z (4.18) dostaneme vztah

$$P \frac{dt}{dx} = \frac{P}{v_p} = k = 8\pi \left(\frac{D}{d}\right)^4 \eta l.$$
(4.21)

Podobně jako u tuhosti je celkový koeficient tlumení vedle sebe řazených tlumičů roven součtu koeficientů tlumení jednotlivých tlumičů v tomtéž směru

$$K = \sum_{i=1}^{n} k_i .$$
 (4.22)
5 Měřicí pracoviště

5.1 Měřicí pracoviště

Na obr. 5.1 je patrné umístění všech měřících přístrojů. Červeně je označena vysokorychlostní kamera Olympus i-Speed 2 s její zobrazovací jednotkou LCD. Žlutě je označena vysoce výkonná osvětlovací lampa, která osvětluje trup letounu. Zeleně je označen laserový vibrometr Ometron VH-1000-D, u kterého je patrné laserové zaměření (červený paprsek). Jak kamera tak i vibrometr jsou umístěny na stativu a ten na podlaze laboratoře. Měření za pomocí laserového vibrometru probíhalo na výškovém kormidle (VOP), jak je patrné z obr. 5.3.



Obr. 5.1 Měřicí pracoviště



Obr. 5.2 Detail letounu EDGE 540



Obr. 5.3 Zaměření laserového vibrometru na VOP

Měření pomocí vysokorychlostní kamery probíhalo na třech stanovištích, první je zobrazeno na obrázku, kamera je namířena z boku na VOP. Dále byla kamera umístěna zepředu před motorem, aby byl vidět pohled zepředu na motor. V dalších měřeních byla kamera namířena z boku na motor pro porovnání pohybu motoru v motorovém loži.

5.2 Uchycení modelu letounu

Pro měření vibrací na modelu letounu bylo potřeba zhotovit vhodný přípravek, který bude schopen udržet ve všech výkonových režimech motoru letoun pevně připoutaný k podlaze laboratoře. Zároveň je nutné zajistit, aby upoutáním letounu došlo k co nejmenšímu ovlivnění přenosu vibrací vznikajících při běhu motoru. Při výkonech pohonné jednotky letounu ovšem nebylo jednoduché navrhnout takto robustní upevnění. Je třeba vzít v úvahu, že statický tah letounu při běhu motoru na plný výkon dosahuje 20 kg a hmotnost letounu je 11,5 kg i s křídly (bez křídel 8,2 kg). Z tohoto důvodu byl vytvořen velice tuhý rám pro upevnění modelu letounu, ten byl po té v rámu zavěšen pružně. To bylo provedeno pomocí uchycení letounu v jeho těžišti ve stejném místě, ve kterém prochází trupem nosník křídel. Tento bod byl pro uchycení vybrán záměrně, jinak by se totiž musel do trupu přidělat otvor navíc, což je nežádoucí, protože se jedná letuschopnou funkční maketu. Navíc konstrukcí trupu je zajištěno vynesení největší pevnosti právě v místě uchycení nosníku křídel. Uchycení letounu v přípravku bylo provedeno pomocí dvou silentbloků.



Obr. 5.4 Přípravek pro uchycení letounu

Tento přípravek byl vytvořen z kovových nosníků o rozměrech 70 x 5 mm, jak je patrné z obr. 5.4, to vše bylo pevně spojeno s laboratorním stolem o vysoké tuhosti. Torzní tuhost byla zajištěna pomocí závitových tyčí, které zvyšovaly tuhost celé konstrukce. Závitovými tyčemi se tedy podařilo podstatným způsobem zvýšit tuhost rámu, to je vidět na obr. 5.5. Dále bylo potřeba zafixovat pohyb letadla kolem jeho těžiště, to bylo provedeno přichycením zadní části trupu letounu přes molitanovou tlumicí hmotu, jak je zobrazeno na obr. 5.6.



Obr. 5.5 Vyztužení přípravku

Obr. 5.6 Detail uchycení trupu

6 Zjištění dominantního zdroje vibrací

Zjištění dominantního zdroje vibrací, způsobených jak samotným benzínovým motorem tak prouděním vzduchu kolem letounu, bylo provedeno následovně:

- Byly změřeny vibrace VOP při běhu spalovacího motoru v celém jeho otáčkovém spektru, při ofukování letounu proudícím vzduchem generovaným otáčením vrtule.
- Dále byl odkloněn proud vzduchu proudící od vrtule mimo trup letounu a VOP, tím byly zjištěny vibrace generované samotným motorem.
- Na místo spalovacího motoru byl instalován elektromotor, který nevytvářel téměř žádné vibrace a tím byly zjištěny vibrace způsobené samotným proudícím vzduchem od vrtule letounu.

6.1 Benzínový motor uložený na pevno

Instalace benzínového motoru k trupu letounu byla provedena následovně. Motorové lože bylo k první motorové přepážce na trupu letounu přichyceno čtyřmi hlavními šroubovými spoji o průměru 8 mm. A motor byl k tomuto loži přichycen pomocí dalších čtyř 6 mm šroubových spojů. Z obr. 6.1 je tedy patrné, že připevnění motoru je tuhé a nedovolí prakticky žádný útlum vibrací.



Obr. 6.1 Benzínový motor uložený na pevno

6.2 Elektromotor uložený na pevno

Ideálním způsobem, jak se vypořádat s vibracemi benzínového motoru, by samozřejmě bylo, nahrazení tohoto motoru elektrickým pohonem o stejném výkonu. Jednak by došlo k určitému snížení hmotnosti pohonného ústrojí. A jednak by došlo ke značnému, nebo až úplnému odstranění vibrací. Je sice pravda, že k určitému podílu na vibracích se kromě motoru podílí také vrtule, která je k pohonu použita, ale tyto vibrace jsou s porovnáním s vibracemi způsobenými spalovacím motorem prakticky zanedbatelné.

Jako náhrada benzínového agregátu byl použit třífázový asynchronní elektromotor *Turnigy Aerodrive SK Series 63-64* o výkonu 3150W. Motor byl připevněn na motorové lože podobně jako jeho benzínový zástupce, nicméně bylo nutné pro jeho menší rozměry prodloužit jeho uchycení závitovými tyčemi o délce 200 mm na místo 6 mm šroubových spojů o délce 40mm (viz obr. 6.2). Podotýkám, že výkon elektromotoru je téměř poloviční než výkon spalovacího motoru a proto nebylo možné dosáhnout se stejnou velikostí vrtule, která byla použita na spalovacím motoru stejně vysokých otáček. Při vyšších otáčkách by došlo k překročení maximálního zatížení elektromotoru a proto jsou měření do 4500 ot/min.

Výkon	3150 W		
Hmotnost	690 g		
Napájecí napětí	25 – 42 V		
Maximální proud	100 A		
Rozsah otáček	200-15000 ot/min		
Proud naprázdno	1,7 A		
Počet pólů	14		
Počet otáček na volt	230 ot/V		
Doporučené vrtule dvoulisté	22 x 12, 24 x 10		

Parametry asynchronního elektromotoru Turnigy Aerodrive SK Series 63-64:



Obr. 6.2 Uložení elektrického motoru

6.3 Parametry naměřené laserovým vibrometrem

V obr. 6.3-a až 6.3-f jsou modře vyneseny vibrace, VOP indukované jak turbulentním prouděním od vrtule, tak i nevyvážeností spalovacího motoru. Zeleně jsou v grafu vyneseny vibrace způsobené jen samotným spalovacím motorem. V tomto případě nebyl trup letadla ovlivňován proudícím vzduchem. Červeně jsou vyneseny vibrace při pohonu elektrickým motorem a s ovlivňováním VOP a trupu proudícím vzduchem od vrtule.

Z obr. 6.3-a až 6.3-f je patrné, že turbulentní proudění od vrtule má v tomto případě spíše stabilizační účinek, to znamená, že vibrace od motoru jsou tlumeny přirozenou stabilizací pohybem okolního vzduchu, který je tvořen proudem od vrtule. Je zde vidět, že již malý proud vzduchu generovaný vrtulí při nízkých otáčkách, kolem 2000 ot/min, má jistý i když minimální stabilizační účinek na VOP. Rychlost a frekvence vibrací je největší při 2500 ot/min, kdy se VOP dostává do rezonance s otáčkami motoru a proud vzduchu je pořád ještě nedostatečný, aby způsoboval určitou stabilizaci. Při 3000 ot/min jsou vibrace nejnižší, řádově asi 4x nižší než vibrace při jakýchkoliv jiných otáčkách. Dále od 3500 ot/min a výše, je již frekvence i rychlost vibrací v zásadě velmi podobná.

Z obr. 6.3-b se na první pohled zdá, že došlo k překročení měřícího rozsahu laserového vibrometru při 114 mm/s a ke zkreslení amplitudy, nicméně přístroj byl nastaven na rozsah 500 mm/s a tudíž nemohlo dojít k překročení jeho rozsahu. To je dokázáno při záporné velikosti amplitudy (-140 mm/s), kde nedošlo ke zkreslení a je dobře patrný její vrchol.



b. 2500 ot/min



d. 3500 ot/min



Obr. 6.3 Vibrace VOP indukované 1) spalovacím motorem a prouděním od vrtule (modře),
2) pouze spalovacím motorem (zeleně) a 3) elektromotorem a prouděním od vrtule (červeně)
při otáčkách 2000-4500 ot/min.

Dále byla provedena diskrétní Fourierova transformace pro zjištění dominantních frekvencí. Rychlost vibrací způsobená spalovacím motorem a turbulentním prouděním od vrtule je vyznačena modře a vibrace způsobené pouze spalovacím motorem jsou vyznačeny zeleně při otáčkách od 2000 – 4500 ot/min. Z obr. 6.4-a až 6.4-f je patrné, že vibrace se pohybují v rozmezí frekvence od 20 – 100 Hz. Od 3000 ot/min frekvence vibrací s rostoucími otáčkami roste v obou případech, při nižších otáčkách toto platí jen při ofukování VOP vrtulí.



a. 2000 ot/min - spalovací motor a proudění od vrtule 24 Hz a 47 Hz (modře), pouze spalovací motor 27 Hz (zeleně)



b. 2500 ot/min - spalovací motor a proudění od vrtule 48 Hz (modře), pouze spalovací motor 93 Hz (zeleně)



c. 3000 ot/min - spalovací motor a proudění od vrtule 57 Hz (modře), pouze spalovací motor 54 Hz (zeleně)



d. 3500 ot/min - spalovací motor a proudění od vrtule 58 Hz (modře), pouze spalovací motor 60 Hz (zeleně)



e. 4000 ot/min - spalovací motor a proudění od vrtule 62 Hz (modře), pouze spalovací motor 63 Hz (zeleně)



f. 4500 ot min - spalovací motor a proudění od vrtule 75 Hz (modře), pouze spalovací motor 75 Hz (zeleně)

Obr. 6.4 Výsledky diskrétní Fourierovy transformace - Vibrace VOP indukované 1) spalovacím motorem a prouděním od vrtule (modře), 2) pouze spalovacím motorem (zeleně) při otáčkách 2000-4500 ot/min.

7 Benzínový motor uložený pružně

Výsledky měření prezentované v kapitole 6 ukazují, že dominantním zdrojem vibrací při provozu akrobatického letounu EDGE 540 je nevyváženost spalovacího motoru. Jedním z bodů zadání této diplomové práce bylo navrhnout přípravek, který by omezil vibrace kriticky namáhaných částí letounu. Jak plyne z teorie vibrací prezentované v kapitole 3, mechanický přenos vibrací z nevyváženého rotačního stroje (motoru letadla) dále do uložení (konstrukce – draku letadla) lze omezit pružným uložením motoru. Jde tedy o velice inovativní přístup, protože u akrobatických modelů letounů se doposud tohoto způsobu nevyužívá.

Proto jsem se rozhodl pro pružné uložení zážehového benzínového motoru. K tomu bylo potřeba použít silentbloky, které měly za úkol nahradit šroubové spoje, tvořící motorové lože, jak je prezentováno v kapitole 6. Motorové lože se tedy může pružně pohybovat v těchto silentblocích. Všechny spoje jsou jištěny samojistnými maticemi, aby nemohlo dojít vlivem vibrací k povolení spoje. K pružnému uložení motoru byly vybrány dva druhy silentbloků o různé tuhosti a velikosti, aby bylo možné porovnání. Oba dva způsoby uložení benzínového motoru jsou patrné z obr. 7.1 – 7.2. Tyto pružné elementy by bylo asi nejlepší umístit do těžiště motoru, nicméně tato možnost je vyloučena z důvodu nedostatku prostoru kolem motoru. Z tohoto důvodu jsem byl nucen umístit tyto pružné elementy mezi motorové lože a trup motoru.



Obr. 7.1 Pružné uložení zážehového benzínového motoru pomocí silentbloků S2025 o tuhosti 55°ShA



Obr. 7.2 Pružné uložení zážehového benzínového motoru pomocí silentbloků 45NR11 o tuhosti 45°ShA

7.1 Pryžové pružné elementy (silentbloky)

K pružnému uložení motoru byly vybrány dva druhy silentbloků, které jsou vyráběny z pryže NR/SBR o tvrdosti 55° ShA a 45° ShA. Pracovní teplotní rozsah je od -40°C do +90°C. I vzhledem k tomu, že hlava válce motoru dosahuje větších teplot než 90°C, je možné tyto pružné elementy použít, protože jsou dostatečně vzdáleny od tohoto tepelného zdroje a jsou také chlazeny proudícím vzduchem od pohybující se vrtule. A proto nejvyšší dosažená teplota na silentblocích nepřesáhla více než 60°C. Dále byla provedena měření, podle kterých byly vybrány vhodné pružné elementy, viz následující kapitola.

Тур		Zatížitelnost			
silentbloku	A	В	С	D	pracovní/
	průměr	výška	rozměr šroubu	velikost	maximální
	silentbloku	silentbloku		matice	
S2025	20	20	M6x15	M6	10/13 Kg
45NR11	22	30	M6x20	M6	12/18 Kg

Tabulka parametrů použitých silentbloků (podle výrobce):



Obr. 7.3 Pružné elementy (silentbloky) v řezu



Obr. 7.4 Pružné elementy (silentbloky) S2025



Obr. 7.5 Pružné elementy (silentbloky) 45NR11

7.1.1 Silentbloky S2025 o tuhosti 55° ShA

Po provedení prvních měření vibrací na VOP s tvrdšími pružnými elementy o tvrdosti 55° ShA s délkou 20 mm a průměrem 20 mm (viz obr. 7.4), bylo zjištěno, že přenos vibrací je vysoký. Tuhost těchto silentbloků je tedy příliš vysoká a velikost malá, to vše dokazují obr. 7.6-a až obr. 7.6-f, na kterých jsou černě zobrazeny vibrace s použitím výše popsaných silentbloků a modře jsou zobrazeny vibrace bez použití silentbloků (motor byl připevněn stejně jako v kapitole 6). U obou dvou způsobů byly trup letounu i VOP ovlivňovány prouděním od vrtule.







Obr. 7.6 Vibrace VOP indukované 1) spalovacím motorem a prouděním od vrtule (modře),
2) spalovacím motorem a prouděním od vrtule s použitím silentbloků S2025 o tvrdosti 55°
ShA (černě) při otáčkách 2000-4500 ot/min.



a. 2000 ot/min – uložení na pevno 24 Hz a 47 Hz (modře), uložení za pomocí silentbloků 293 Hz (černě)



 b. 2500 ot/min – uložení na pevno 48 Hz (modře), uložení za pomocí silentbloků 312 Hz (černě)



c. 3000 ot/min – uložení na pevno 57 Hz (modře), uložení za pomocí silentbloků 272 Hz a 289 Hz (černě).



d. 3500 ot/min – uložení na pevno 58 Hz (modře), uložení za pomocí silentbloků 122 Hz a 238 Hz (černě).



e. 4000 ot/min – uložení na pevno 62 Hz (modře), uložení za pomocí silentbloků 242 Hz (černě)



f. 4500 ot min – uložení na pevno 75 Hz (modře), uložení za pomocí silentbloků 121 Hz a 240 Hz (černě)
Obr. 7.7 Výsledky diskrétní Fourierovy transformace - Vibrace VOP indukované spalovacím motorem a prouděním od vrtule 1) uložení na pevno (modře), 2) uložení s použitím silentbloků S2025 o tvrdosti 55° ShA (černě) při otáčkách 2000-4500 ot/min.

Dále byla provedena diskrétní Fourierova transformace pro zjištění dominantních frekvencí. Na obr. 7.7-a až 7.7-f je rychlost vibrací způsobená spalovacím motorem a turbulentním prouděním od vrtule, při uložení benzínového motoru na pevno vyznačena modře a vibrace s uložením motoru za pomocí silentbloků jsou vyznačeny černě. Je patrné, že vibrace při uložení motoru na pevno se pohybují v rozmezí frekvence od 20 – 100 Hz, ale vibrace při uložení motoru pomocí silentbloků se pohybují od 100 – 320Hz.

7.1.2 Silentbloky 45NR11 o tuhosti 45° ShA

Proto byly pro další měření vibrací na VOP vybrány pružné elementy s nižší tuhostí. Ty jsou také z pryže NR/SBR, ale o tvrdosti 45°ShA. Tyto pružné elementy mají také větší rozměry a to délku 30 mm a průměr 22 mm (viz obr. 7.5). Bylo zjištěno, že jsou mnohem vhodnější a přenos vibrací z motoru na trup letounu se tedy snížil více než při použití tvrdších silentbloků. To vše dokazují obr. 7.8-a až obr. 7.8-f, na kterých jsou černě zobrazeny vibrace s použitím výše popsaných silentbloků a modře jsou zobrazeny vibrace bez použití silentbloků (motor byl připevněn stejně jako v kapitole 6). U obou dvou způsobů byly trup letounu i VOP ovlivňovány prouděním od vrtule.









Obr. 7.8 Vibrace VOP indukované 1) spalovacím motorem a prouděním od vrtule (modře),
2) spalovacím motorem a prouděním od vrtule s použitím silentbloků 45NR11 o tvrdosti 45°
ShA (černě) při otáčkách 2000-4500 ot/min.

Dále byla provedena diskrétní Fourierova transformace pro zjištění dominantních frekvencí. Bylo zjištěno, že dominantní frekvence jsou shodné s obr. 7.7-a až 7.7-f a proto nejsou dále uvedeny. Jediná změna která nastala při použití silentbloků s nižší tuhostí, bylo snížení amplitud kmitů, což je patrné z obr. 7.8-a až obr. 7.8-f. Je možné konstatovat, že tvrdost silentbloků 45NR11 je pro motor o obsahu 80 cm³ s hmotností kolem 2 kilogramů ideální a zároveň zajišťují vysokou elasticitu.

7.2 Naměřené parametry pomocí rychlostní kamery

7.2.1 Otáčky 2000 - 2300 ot/min

Pro zjištění amplitud a tvarů kmitů motoru v motorovém loži byla použita rychlostní kamera. Ta byla nastavena na 500 snímků za vteřinu. Velikost těchto kmitů je velice důležitá, protože by jinak mohlo dojít k překročení pevnosti a destrukci silentbloků. Na obr. 7.9 je zachycen děj trvající 0,03 s. Je složen z 15 snímků zachycených vysokorychlostní kamerou, které jsou zobrazeny přes sebe s určitou průhledností. Na obr. je čísly 1. až 4. vyznačen pohyb v silentblocích a číslem 5. je označen pohyb osy hřídele motoru. Proto je dobře patrný samotný pohyb motoru v jeho rezonanční frekvenci. Tento děj nastává těsně nad volnoběžnými otáčkami motoru. U všech pružných elementů, je červeně označen pohyb směrem dolů a zeleně pohyb druhým směrem nahoru, žlutě je vyznačeno kde se body vzájemně překrývají.

Je patrné, že nevyváženost klikového ústrojí motoru způsobuje extrémní výchylku motoru 9,5°, což hraničí až s bezpečností provozu. Během 5 minut provozu v tomto režimu došlo k odtržení gumového pouzdra silentbloku. Je bezesporu nutné omezit tyto výchylky. K řešení se nabízí dvě alternativy:

 Použít tužší pružné elementy, to by ovšem způsobovalo větší přenos vibrací na drak letounu.





Obr. 7.9 Otáčky 2000 - 2300 ot/min – pohled zepředu

7.2.2 Otáčky 3000 ot/min

Zde je podobně jako na předchozím obrázku dobře patrný děj trvající 0,02 s, který je složen z 10 snímků. U všech pružných elementů, je pohyb vyznačen pouze červeně, protože se body pohybující oběma směry navzájem překrývají.

Je patrné, že velikost výchylky motoru se značně snížila a to na 2,5°. Při těchto otáčkách motoru je vidět, že funkce pružných elementů je dostačující a dochází tedy ke značnému snížení vibrací.



Obr. 7.10 Otáčky 3000 ot/min – pohled zepředu

7.2.3 Otáčky 6000 ot/min

Z obr. 7.11 a také z předchozího obr. 7.10 zachycujícího děj při 3000 ot/min, je možné usoudit, že v rozmezí 3000 – 6000 ot/min je funkce motorového lože pro snížení vibrací ideální a nedochází zde k výraznému zatížení pružných elementů. Tudíž není potřeba konstrukčně nic měnit. Na obr. 7.11 je tedy zachycen děj trvající 0,008 s, který je složen ze 4 snímků. Pohyb je jako u předchozího obrázku vyznačen pouze červeně z již uvedených důvodů. Výchylka činila pouhých 1,5°. Z čehož vyplývá, že se zvyšujícími se otáčkami dochází ke snižování kmitů benzínového motoru.



Obr. 7.11 Otáčky 6000 ot/min – pohled zepředu

8 Benzínový motor uložený pružně s pomocí tlumičů bočních kmitů

Z důvodů vysokých amplitud bočních kmitů benzínového motoru v nízkých otáčkách jsem se rozhodl vyzkoušet použití tlumičů bočních kmitů.

8.1 Tlumicí členy

Při pružném ukládání pohonných jednotek se používá velmi zřídka tlumicích elementů. Nicméně problém vibrací v rezonanční frekvenci motoru (2000 - 2300 ot/min) viz kapitola 7.2.1, nebylo možné vyřešit jinak, než použitím právě těchto tlumičů. Tlumiče byly umístěny v ose největších kmitů (obr. 8.3 - 8.4). Pro tuto aplikaci byly vybrány tlumiče zobrazené na obr. 8.1, jejichž tělo je vysoustruženo do tvaru chladiče pro lepší odvod tepla. Tyto tlumiče maří určitou energii, která se převádí do tepla a dochází tedy k zahřívaní těl těchto tlumičů. Při provozu tlumičů v otáčkách největších kmitů došlo po 5 minutovém provozu k ohřátí těchto tlumičů na 60° C. Je tudíž třeba omezit dlouhodobý provoz motoru v těchto otáčkách, aby nedocházelo k přehřívání tlumičů.



Obr. 8.1 *Tlumič*



Obr. 8.2 *Tlumicí člen v řezu*

Parametry tlumícího členu:

D - 18 mm d - 1.6 mm l - 2.1 mm $\eta - \text{viskozita kapaliny} = 700 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1} [\text{cSt}]$



Obr. 8.3 Pružné uložení zážehového benzínového motoru pomocí silentbloků 45°ShA a tlumičů bočních kmitů



Obr. 8.4 Detail uložení obou tlumičů bočních kmitů (v levo je zobrazen levý a v pravo je zobrazen pravý tlumič)

8.1.1 Otáčky 2000 - 2300 ot/min

Ze záznamu pořízeného za pomocí rychlostní kamery obr. 8.4, je patrné, že došlo ke snížení výchylky bočních kmitů z 9,5° na 3°. Z toho je možné konstatovat, že tlumiče splnily svou funkci velmi dobře. Pro tento záznam byla rychlostní kamera nastavena na 1000 snímků za vteřinu. A proto se celý děj skládá z 30 snímků a trvá 0,03 s. Protože se zvyšujícími se otáčkami dochází ke snižování kmitů benzínového motoru, neměly tlumiče bočních kmitů při vyšších otáčkách již takovou účinnost a proto byly výchylky stejné jako v kapitole 7.2. Z tohoto důvodu dále neuvádím snímky pořízené při vyšších otáčkách.

Po zhodnocení dat z laserového vibrometru bylo zjištěno, že rychlost i frekvence vibrací jsou stejné jako v kapitole 7 a proto nemá smysl je zde dále uvádět. Všechna naměřená videa z této práce pomocí rychlostní kamery jsou uložena na přiloženém DVD.



Obr. 8.4 Otáčky 2000 - 2300 ot/min – pohled zepředu

8.2 Tlumič výfuku

Bylo také potřeba zajistit odvětrávání výfukových spalin benzínového motoru. To bylo zajištěno odsávacím systémem v laboratoři a napojením tohoto systému na tlumič výfuku letounu, který je vyveden z trupu pomocí ohebné trubky na něj napojené.

Z důvodu nezanedbatelných kmitů motoru při pružném uchycení, bylo nutné připevnit pružně i expanzní tlumič výfuku (obr. 8.6). Jinak by došlo k poškození svodů od motoru nebo samotné hlavy válce. Uložení bylo provedeno také pomocí silentbloků, podobně jako u uložení motoru. Expanzní tlumič i se svody byl uchycen ve svém těžišti na dvou pružných elementech k trupu letounu (obr. 8.5). Tlumič výfuku je s motorem spojen svodem, který je také pružný a proto nedochází k namáhání hlavy válce motoru. Pružné elementy, které slouží k uchycení motoru, slouží také ke snížení přenášeného hluku z benzínového motoru na tlumič výfuku. Pokud by byl tlumič výfuku umístěn na pevno k dřevěné konstrukci trupu letounu, docházelo by ke značnému přenosu hluku.



Obr. 8.5 Pružné uložení tlumiče výfuku

Obr. 8.6 Detail upevnění

9 Závěr

Provedenými experimenty a měřeními bylo zjištěno, že dochází k určitému zkreslení výsledků měření z důvodů uložení modelu letounu v přípravku sestaveném pro tuto práci. Ideální by totiž bylo měřit rychlost vibrací na letounu za letu, to by ale překračovalo rozsah DP a na pracovišti školitele (NTI) k tomu není vhodný systém. Také bylo zjištěno, že u spalovacího motoru daného typu není možné odstranit vibrace jen pomocí uložení motoru do silentbloků. Analýzy prokázaly, že sice při vysokých otáčkách motoru dochází k značnému útlumu vibrací přenášených do konstrukce (draku) letounu, avšak při nízkých otáčkách nastává značný problém se zvýšením úrovní vibrací, tj. amplitud. Důležitým poznatkem je skutečnost, že tento způsob uložení motoru by také značně snižoval životnost motoru, protože není navržen na takto velké a rychlé boční kmity válce, které značně ovlivňují životnost pístních kroužků a pístu samotného.

Nabízí se tedy dvě možnosti, jak tento problém u daného typu motoru řešit:

- Omezit otáčkové režimy motoru tak, aby se motor nemohl pohybovat v nebezpečných hodnotách otáček. To je však možné jen u letounů nepoužívaných pro akrobacii, protože při cestovním letu motor pracuje na 80-100% svého výkonu, a nebo na volnoběh.
- 2. Omezit boční kmity pomocí tlumičů bočních kmitů, protože akrobatické letouny musí mít velmi výkonné motorové agregáty. Je tudíž potřeba tyto pohonné jednotky používat v širokém rozsahu otáček. Odtud vyplývá, že je potřeba najít způsob, jak při určitých otáčkách snížit boční kmity motoru. Proto bylo v průběhu řešení diplomového projektu rozhodnuto realizovat úpravy konstrukce a experimentu také za pomocí tlumičů bočních kmitů. Jak bylo ukázáno, takové řešení pomohlo do značné míry redukovat boční kmity motoru. Jejich zapojení do konstrukce uložení motoru je však poměrně složité a při jejich aplikaci bude rovněž rozhodovat jejich cena, která je momentálně asi desetinásobně vyšší než cena silentbloků.

Nicméně z řešení projektu vychází doporučení, se tomuto problému nadále věnovat.

Literatura

- [1] Půst, L., Lada, M.: Pružné ukládání strojů. Praha 1965.
- [2] Smetana, C. a kolektiv: Hluk a vibrace, měření a hodnocení. Praha, Sdělovací technika, 1998.
- [3] Bartoníček, L.: Konstrukce pístových spalovací motorů. Liberec 1992.
- [4] Hoschl, C.: Nauka o kmitání. Liberec 1969.
- [5] Macek, J., Suk, B.: Spalovací motory I. ČVUT 1996.
- [6] Svatomír, S.: Pohonná jednotka, Drak a systémy, Výkonnost. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL-1, Brno 2005.
- [7] Bottega, W.J.: Engineering vibrations. Boca Raton CRC/Taylor & Francis, 2006.
- [8] Zajac, J.: Znižovanie hluku a vibracií v strojárskych prevádzkach. Bratislava: Alfa, 1990.
- [9] Meirovitch, L.: Principles and techniques of vibrations. Upper Saddle River, Prentice Hall, 1997.
- [10] Brož, V.: Aerodynamika nízkých rychlostí. Skriptum ČVUT, Praha 2001.
- [11] Timoshenko, S., Young, D.H., Weaver, W.: Vibration Problems in Engineering. USA John Wiley a.sons, 1974.