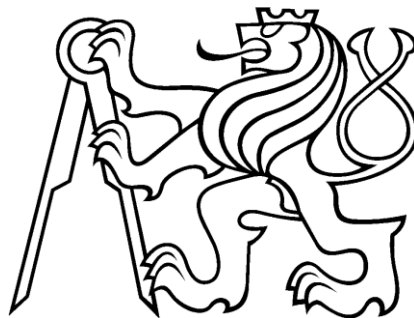


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav letadlové techniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Pozemní frekvenční zkouška vodorovné ocasní plochy

letounu Phoenix

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Aleš Kratochvíl

Autor: David Rytina

Praha 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením určeného vedoucího a použil jsem pouze těch literárních pramenů, které jsou uvedeny v příloženém seznamu. Bakalářskou práci jsem zpracoval v souladu se všemi předpisy a nařízeními platnými o napsání bakalářských prací.

V Praze dne 31. května 2015

David Rytina

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval všem, kteří mi pomohli svými informacemi k vypracování bakalářské práce. Především bych chtěl poděkovat Ing. Aleši Kratochvílovi, vedoucímu mé bakalářské práce, za poskytování odborných rad a předávání zkušeností. Zvláštní poděkování patří mé rodině, přítelkyni a v neposlední řadě i kolegům za jejich podporu při studiu.

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Vlastní měření.....	2
2.1 Měření hmotnostních charakteristik a rozměrů VOP.....	2
2.2 Měření frekvenčních charakteristik.....	5
3. Vyhodnocení naměřených hodnot.....	8
3.1 Vyhodnocení hmotových charakteristik.....	8
3.1.1 Vyhodnocení přídatného momentu setrvačnosti.....	12
3.2 Vyhodnocení vlastních frekvencí konstrukce.....	15
3.3 Vyhodnocení konstrukčního tlumení.....	29
4. Příprava geometrie pro výpočet flutteru.....	21
5. Závěr.....	22
6. Přehled použité literatury.....	23
7. Přílohy.....	24

Seznam obrázků

Obr.	název (zdroj)	strana
Obr 2.1	– rozměr VOP (autor).....	2
Obr 2.2	– uložení kormidla (autor).....	3
Obr 2.3	– zaměření svislíce (autor).....	3
Obr 2.4	– odečet síly P (autor).....	3
Obr 2.5	– mobilní laboratoř (autor).....	5
Obr 2.6	– budič (autor).....	5
Obr 2.7	– siloměr (autor).....	5
Obr 2.8	– akcelerometr (autor).....	5
Obr 2.9	– nafukovací vak (autor).....	6
Obr 2.10	– vývěva (autor).....	6
Obr 2.11	– buzení VK (autor).....	6
Obr 2.12	– lehká konfigurace (autor).....	7
Obr 2.13	– těžká konfigurace (autor).....	7
Obr 2.14	– buzení SOP (autor).....	7
Obr 3.1	– uložení na čepech (autor).....	9
Obr 3.2	– uložení na břitech (autor).....	9
Obr 3.3	– určení SAT (autor).....	10
Obr 3.4	– symbolika trasy řízení ([3]).....	12
Obr 3.5	– trasa řízení (autor).....	13
Obr 3.6	– model pomocné páky (autor).....	14
Obr 3.7	– geometrické charakteristiky modelu (autor).....	14
Obr 3.8	– zobrazení geometrie a přenosové funkce (autor).....	15
Obr 3.9	– extrém magnitudy (autor).....	16
Obr 3.10	– vlastní frekvence (autor).....	16
Obr 3.11	– ohybové módy ([3]).....	17
Obr 3.12	– určení $\omega_{1,2}$ (autor).....	19
Obr 3.13	– nesymetrický průběh tlumení (autor).....	20
Obr 4.1	– geometrické charakteristiky VOP (autor).....	21
Obr 4.2	– geometrické charakteristiky VK (autor).....	21

Seznam tabulek

Tab.	název (zdroj)	strana
Tab. 2.1	– naměřené hodnoty (autor).....	4
Tab. 2.2	– T_s stabilizátoru (autor).....	4
Tab. 2.3	– T_s VK (autor).....	4
Tab. 2.4	– použité měřicí přístroje (autor).....	4
Tab. 2.3	– použité přístroje (autor).....	7
Tab. 3.1	– vypočítané hodnoty hmotnostních charakteristik (autor).....	9
Tab. 3.2	– výsledné hodnoty pro VOP (autor).....	11
Tab. 3.3	– výsledné hodnoty pro VK (autor).....	11
Tab. 3.4	– hodnoty pro určení ΔJ (autor).....	13
Tab. 3.5	– výsledné hodnoty ΔJ (autor).....	14
Tab. 3.6	– vlastní frekvence VK blokové (autor).....	17
Tab. 3.7	– vlastní frekvence VK volné (autor).....	17
Tab. 3.8	– vlastní frekvence VOP lehká (autor).....	17
Tab. 3.9	– vlastní frekvence VOP těžká (autor).....	18
Tab. 3.10	– vlastní frekvence SOP lehká (autor).....	18
Tab. 3.11	– vlastní frekvence SOP těžká (autor).....	18

Seznam příloh

Příloha č.	název (zdroj)	strana
Příloha č.1	– hmotnostní charakteristiky (autor).....	24
Příloha č.2	– trasa řízení (autor).....	25
Příloha č.3	– předloha řízení a páka řízení (Phoenix Air)	
Příloha č.4	– táhlo VK přední (Phoenix Air)	
Příloha č.5	– pomocná páka (Phoenix Air)	
Příloha č.6	– táhlo VK zadní (Phoenix Air)	
Příloha č.7	– páka VK (Phoenix Air)	
Příloha č.8	– svislé táhlo VK (Phoenix Air)	

Seznam použitých zkratek a indexů

VOP	vodorovná ocasní plocha	
VK	výškové kormidlo	
SOP	svislá ocasní plocha	
Y	poloha řezu od podélné osy letounu	[m]
m	hmotnost	[kg]
\bar{m}	měrná hmotnost	[kg/m]
\bar{S}	měrný statický moment	[kg/m*m]
\bar{J}	měrný moment setrvačnosti	[kg/m*m ²]
NH	náběžná hrana	
OO	osa otáčení	
ΔJ	přídavný moment setrvačnosti	[kg*m ²]
$\left(\frac{ds_i}{d\beta}\right)$	převodová funkce i-tého posuvného členu	[m/rad]
$\left(\frac{d\alpha_m}{d\beta}\right)$	převodová funkce m-tého rotačního členu	[rad/rad]
c	vzdálenost osy otáčení od odtokové hrany	[m]
d β	úhel natočení kormidel	[rad]
L	délka VOP	[m]
d α	úhel natočení pák	[rad]
ds	posuv táhla řízení	[m]
f	frekvence kmitu	[Hz]
P	síla působící na odtokovou hranu	[N]
g	gravitační zrychlení	[ms ⁻²]
r _s	poloha těžiště od osy otáčení	[m]
d	průměr čepu	[m]
T	průměrná doba jednoho kmitu	[s]
T1-i	počet měření	[1]
T _s	doba 10. kmitů A-B-A	[s]
T ₀	doba jednoho kmitu T _s /10	[s]
b	hloubka profilu	[m]
D	dekrement útlumu	[1]
SAT	střední aerodynamická tětíva	

Anotace

Tato bakalářská práce ukazuje postup při pozemní frekvenční zkoušce vodorovné ocasní plochy letounu Phoenix. V první části je popisován způsob měření frekvenčních a hmotových charakteristik. V navazující části byly vyhodnoceny hmotové, geometrické a modální charakteristiky. Výsledky jsou zobrazeny pomocí vhodných grafů a tabulek.

Abstract

This thesis shows a process of a ground vibration test of the horizontal tail plane for Phoenix Airplane. The first part describes a procedure for measuring the frequency and mass data. In the following sections were evaluated mass, geometry and modal characteristics. The results are displayed using appropriate graphs and tables.

1. Úvod

Bakalářská práce se zabývá postupem stanovení hmotových, geometrických a modálních charakteristik vodorovné ocasní plochy letounu Phoenix. Výsledky výpočtů slouží jako vstupní data pro výpočet minimální rychlosti letu, při níž může dojít ke vzniku flutteru. Na základě tohoto výpočtu je vydán průkaz flutterové odolnosti letounu dle předpisu CS 23.629. Pozemní frekvenční zkouška byla provedena mobilní laboratoří TREFA (transportovatelná rychlá experimentální frekvenční analýza).

Stanovení setrvačných charakteristik, vyhodnocení modálních charakteristik z pozemní frekvenční zkoušky a určení vlivu trasy řízení výškového kormidla je jen část činností nutných ke stanovení flutterové odolnosti letounu. Další výpočtové postupy nejsou obsahem zadání této bakalářské práce, proto nelze v této fázi dojít k jednoznačnému závěru.

Ultralehký letoun Phoenix U15 je celokompozitní dvoumístný dolnoplošník ostruhového uspořádání podvozku s motorem Rotax 912. Výrobce je společnost Phoenix Air se sídlem v Ústí nad Orlicí.

Základní technická data:

- rozpětí: 15 m
- délka: 6,5 m
- výška: 1,47 m
- prázdná hmotnost: 295 kg
- maximální vzletová hmotnost: 472,5 kg
- maximální rychlost: 260 km/h
- minimální rychlost: 65 km/h

2. Vlastní měření

2.1 Měření hmotových charakteristik a rozměrů VOP

Vstupními hodnotami pro matematický model flutterové odolnosti jsou mimo jiné: měrná hmotnost, měrný moment setrvačnosti a měrný statický moment. Pro jejich výpočet byla nejprve zvažena hmotnost m [kg] VK a stabilizátoru, změřena délka L [m] VOP, změřena vzdálenost c [m], stanovena síla P [N] na konci odtokové hrany a průměrná doba deseti kmitů T_s [sec]. Postup byl proveden dle metodiky [1].

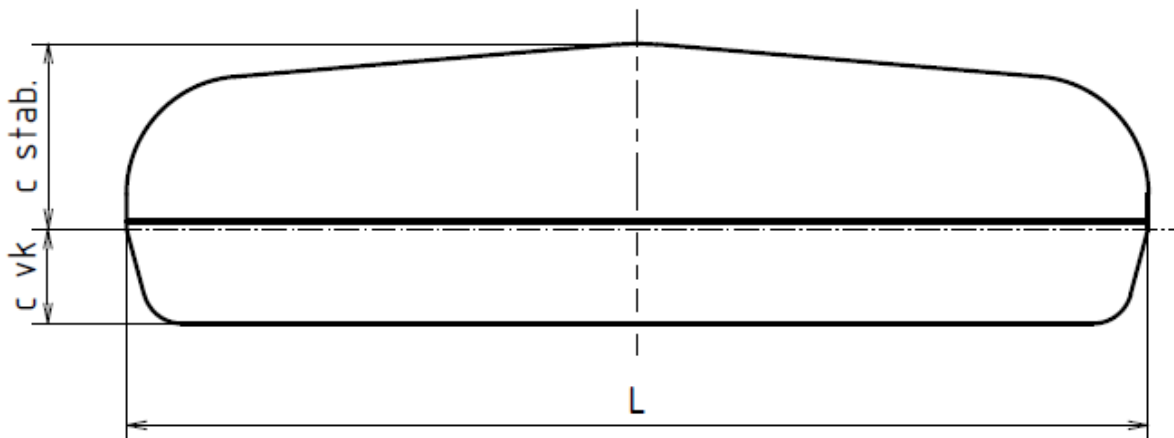
Menší díly, jako jsou VK a stabilizátor, jsou na místě váženy, protože výpočet hmotností kompozitních dílů je komplikovaný a nepřesný. Hmotnosti dílů trasy řízení, jejich výchylky a momenty setrvačnosti byly získány z dodané dokumentace od výrobce letounu.

Určení hmotnosti VK a stabilizátoru:

Hmotnost m [Kg] VK a stabilizátoru byla určena vážením na digitální váze. Hodnoty (viz Tab. 2.1).

Měření délky VOP:

Délka L [m] VOP byla změřena prostým měřením metrem v místě napojení VK se stabilizátorem (viz Obr. 2.1). Hodnoty (viz Tab. 2.1).



Obr. 2.1 - rozměr VOP (autor)

Měření rozměru c:

Rozměr c [m] je u stabilizátoru vzdálenost náběžné hrany od osy otáčení a u VK je to vzdálenost odtokové hrany od osy otáčení (viz. Obr. 2.1). Tento rozměr byl měřen prostým měřením s hodnotami (viz Tab. 2.1).

Měření síly P:

Síla P [N] byla stanovena tak, že se kormidlo zavěsilo do stojanu a nechalo ustálit (viz *Obr. 2.2*). Poté se záměrným křížem naznačila svislice na boku kormidla (viz *Obr. 2.3*). Dále se naznačená svislice přemístila do horizontální polohy a připevnil se mincí k odtokové hraně. Přes minci se svislice držela v horizontální poloze, která byla zaměřena záměrným křížem a odečtena hodnota síly potřebné k udržení této polohy (viz *Obr. 2.4*). Hodnoty (viz *Tab.2.1*).



Obr. 2.2 - uložení kormidla (zdroj: autor)



Obr. 2.3 - zaměření svislice (zdroj: autor)



Obr. 2.4 - odečet síly P (zdroj: autor)

Měření průměrné doby deseti kmitů T_s :

Z důvodu zvýšení přesnosti výsledků se doba kmitu nepočítala jen z jednoho kmitu, ale z doby deseti kmitů T_s byla vypočítána průměrná doba jednoho kmitu T_0 . Toto měření se opakovalo 5x až 6x a teprve z této hodnoty se určila průměrná doba jednoho kmitu T [sec].

Kormidlo se vychýlilo o maximálně 5° (poloha A). Po uvolnění kormidlo překmitlo do druhé maximální výchylky (poloha B). T_s [sec] je doba 10 kmitů A-B-A. Hodnoty pro stabilizátor (viz Tab. 2.2) a hodnoty pro VK (viz Tab. 2.3), kde T_{1-i} je počet měření.

	m	c	P	L
výškovka	1,945	0,224	7,550	2,465
stabilizátor	4,021	0,465	17,950	2,465

Tab. 2.1 - naměřené hodnoty (zdroj: autor)

	T_s
T_1	10,6
T_2	10,82
T_3	10,76
T_4	10,69
T_5	10,77

Tab. 2.2 – T_s stabilizátoru (zdroj: autor)

	T_s
T_1	7,28
T_2	7,26
T_3	7,4
T_4	7,15
T_5	4,27
T_6	7,25

Tab. 2.3 – T_s VK (zdroj: autor)

Použitý přístroj	Typové označení	Výrobce
Laserový zaměřovací kříž	GLL 3 – 80 P	BOSH
Stopky	C 5085	CONRAD
Mincíř	HDB 5K5 N	KERN
Váha	PCB 6Kg	KERN
Úhломěr	GLM 80	BOSH
Svinovací metr	PEN 89	KOMELON

Tab. 2.4 – použité měřicí přístroje (zdroj: autor)

2.2 Měření frekvenčních charakteristik

Dalšími vstupními hodnotami pro matematický model flutterové odolnosti jsou modální charakteristiky, tj.: mód, vlastní frekvence, tvar vlastních kmitů a konstrukční tlumení. K jejich vyhodnocení slouží přenosová funkce, která byla získána při pozemní frekvenční zkoušce.

Zkouška vychází z postupu experimentální analýzy konstrukce buzené harmonickou silou s proměnnou frekvencí do 100 Hz. K pozemnímu měření frekvenčních charakteristik byla použita mobilní laboratoř (viz *Obr. 2.5*), jejíž součástí jsou dva budiče (viz *Obr. 2.6*) s piezoelektrickým snímačem budící síly (viz *Obr. 2.7*). Odezvy konstrukce jsou snímány akcelerometry (viz *Obr. 2.8*), jejichž poloha je definována.

Budiče byly buzeny symetricky (ve fázi), tj. budící průběh byl symetrický pro oba budiče. Ve druhé variantě byly budiče buzeny nesymetricky (v protifázi), tj. budící průběh byl posunut o π .



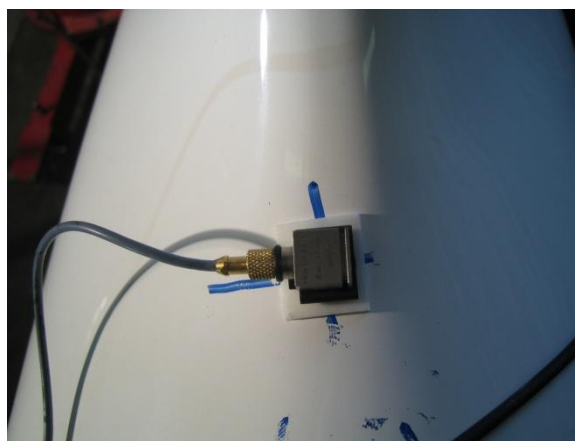
Obr. 2.5 - mobilní laboratoř (zdroj: autor)



Obr. 2.6 - budiče (zdroj: autor)



Obr. 2.7 - siloměr (zdroj: autor)



Obr. 2.8 - akcelerometr (zdroj: autor)

Data ze siloměrů, které jsou součástí budičů a akcelerometrů umístěných na konstrukci letounu, byla zpracována v reálném čase do přenosové funkce, ze které byla dále provedena identifikace modálních charakteristik. Pro zajištění volnosti pohybu ve všech šesti stupních volnosti byl letoun umístěn na nafukovacích vacích (viz *Obr. 2.9 a 2.6*).

Během pozemní frekvenční zkoušky VOP byly budiče umístěny pod VOP (viz *Obr. 2.6*). Budiče byly ke konstrukci přichyceny podtlakem pomocí přísavek (viz *Obr. 2.7*).

spojených s vývěvou (viz *Obr. 2.10*). Matematický model vyžaduje, aby VK bylo zafixované k aerodynamické ploše. Pro měření VK byl letoun z vaků spuštěn na pevnou podlahu, poté se zafixoval stabilizátor. Budiče byly přichyceny k VK přes kleštinu (viz *Obr. 2.11*).



Obr. 2.9 – nafukovací vak (zdroj: autor)



Obr. 2.10 - vývěva (zdroj: autor)



Obr. 2.11 – buzení VK (zdroj: autor)

Pozemní měření frekvenční charakteristiky bylo provedeno ve dvou hmotnostních variantách:

- 1) Lehká - bez paliva a zátěže (viz *Obr. 2.12*).
- 2) Těžká - s maximálním množstvím paliva a se zátěží (viz *Obr. 2.13*).

Pro zahrnutí vlivu pilota na modální parametry kormidla bylo měření kormidel provedeno ve dvou extrémních stavech:

- 1) Volné řízení - řídicí páka a nožní řízení jsou volné, odpovídá stavu řízení bez kontaktu pilota (viz *Obr. 2.12*).
- 2) Blokové řízení – blokace řídicí páky a nožního řízení v neutrální poloze pomocí řetězu a pevné pásky. Tento stav odpovídá pevnému držení řízení pilotem (viz *Obr. 2.13*).



Obr. 2.12 – lehká konfigurace (zdroj: autor)



Obr. 2.13 – těžká konfigurace (zdroj: autor)

Vzhledem k tomu, že VOP a SOP jsou spolu pevně spojeny a je možné ovlivnění VOP, byly vyhodnoceny i modální charakteristiky pro SOP. Umístění budiče a uchycení k SOP (viz Obr. 2.14).



Obr. 2.14 – buzení SOP (zdroj: autor)

Použitý přístroj	Typové označení	Výrobce
Modální analyzátor	TL-5412_CCD	
Postprocesingový procesor	ME'ScopeVES	Vibrant Technology
Elektrodynamický budič	ET-132	Blabworks
Piezelektrický snímač síly	8230-001	BRÜEL&KJAER
Piezelektrický akcelerometr	4507 B	BRÜEL&KJAER
Dynamický analyzátor	PULSE 3560C	BRÜEL&KJAER
Kalibr piezelektrických akcelerometrů	Type 4292	BRÜEL&KJAER
Úhломěr kleštín piezelektrických		Kovine

Tab. 2.5 – použité přístroje (zdroj: autor)

3. Vyhodnocení naměřených hodnot

3.1 Vyhodnocení hmotových charakteristik

Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.1, vstupními hodnotami do matematického modelu flutterové odolnosti jsou měrné veličiny. Pro určení jejich hodnot byly vypočítány následující hmotové charakteristiky: výpočet průměrné doby jednoho kmitu T [sec], frekvence f [Hz], poloha těžiště r_s [m], statický moment k ose otáčení S_{oo} [kg.m], moment setrvačnosti k ose otáčení J_{oo} [kg.m²].

Výsledné hodnoty výpočtů (viz Tab. 3.1). Výpočet těchto hmotových charakteristik byl proveden dle metodiky [1].

Výpočet průměrné doby jednoho kmitu T:

Tento výpočet byl proveden dle vzorce:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n T_0}{n} \quad [\text{m}]$$

Kde T_0 je $T_s/10$.

Výpočet frekvence f:

Tento výpočet byl proveden dle vzorce:

$$f = \frac{1}{T} \quad [\text{Hz}]$$

Výpočet polohy těžiště od osy otáčení r_s :

Tento výpočet byl proveden dle vzorce:

$$r_s = \frac{c \cdot P}{m \cdot g} \quad [\text{m}]$$

Výpočet statického momentu k ose otáčení S_{oo} :

Tento výpočet byl proveden dle vzorce:

$$S = r_s \cdot m \quad [\text{kg.m}]$$

Výpočet momentu setrvačnosti k ose otáčení J_{oo} :

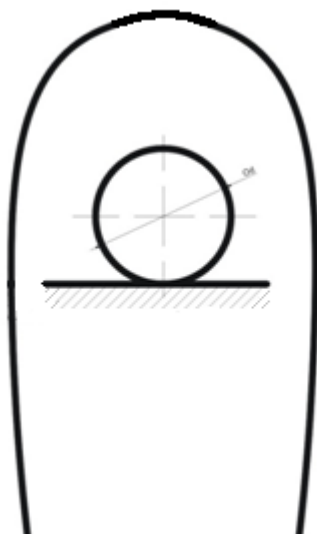
Tento výpočet byl proveden dle vzorce:

$$J = \frac{r_s \cdot m \cdot g}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2} + m \cdot \left(r_s \cdot d - \frac{d^2}{4} \right) \quad [\text{kg.m}^2]$$

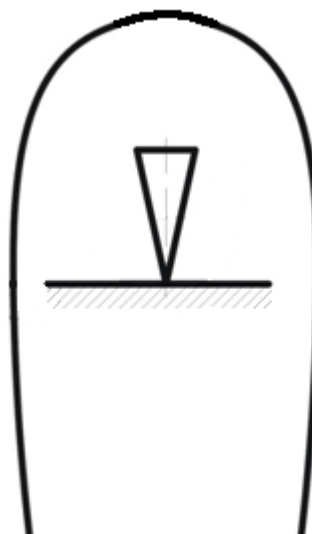
Existují 2 způsoby uložení kormidel pro pozemní měření hmotových charakteristik.

1) Uložení na čepech (viz Obr. 3.1). Při pozemní zkoušce bylo takto uloženo VK. Potom d je průměr čepu uložení. V tomto případě $\varnothing d = 0,006$ m.

2) Uložení na břitech (viz Obr. 3.2), potom $d = 0$. V tomto případě uložení stabilizátoru.



Obr. 3.1 - uložení na čepch (zdroj: autor)



Obr. 3.2 - uložení na břitech (zdroj: autor)

	T	f	r _s	S _{oo}	J _{oo}
Výškovka	0,677	1,477	0,089	0,172	0,020
Stab.	1,073	0,932	0,212	0,851	0,243

Tab. 3.1 – vypočítané hodnoty hmotnostních charakteristik (zdroj: autor)

Pro výpočtový model byly hodnoty $S_{oo\ vk}$, $S_{oo\ stab}$, $J_{oo\ vk}$ a $J_{oo\ stab}$ přepočítány na momenty k náběžné hraně VOP a to $S_{nh\ vop}$ a $J_{nh\ vop}$. Tento přepočítání se prováděl pro $S_{nh\ vop}$ sečtením obou hodnot S k náběžné hraně. Pro určení J byla použita Steinerova věta. Výsledné hodnoty (viz Tab.4.2).

Aplikované výpočtové vzorce:

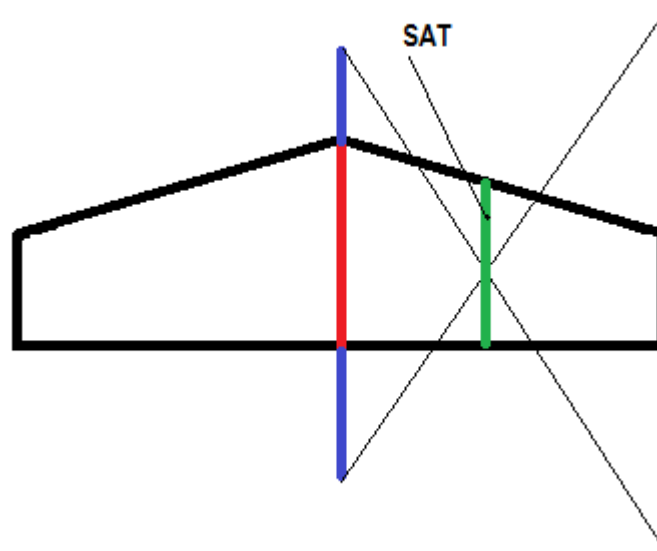
$$S_{nh\ vop} = [m_{vk} \cdot (c_{sat} + r_{s\ vk})] + [m_{stab} \cdot (c_{stab} - r_{s\ stab})] \quad [kg.m]$$

$$S_{nh\ vop} = [1,945 \cdot (0,4 + 0,089)] + [4,021 \cdot (0,465 - 0,212)] = 1,969 \quad [kg.m]$$

$$J_{nh\ vop} = [J_{oo\ stab} - (m_{stab} \cdot r_{s\ stab}^2)] + [m_{stab} \cdot (c_{stab} - r_{s\ stab})^2] \quad [kg.m^2]$$

$$J_{nh\ vop} = [0,243 - (4,021 \cdot 0,212^2)] + [4,021 \cdot (0,465 - 0,212)^2] = 0,138 \quad [kg.m^2]$$

Vzhledem k tomu, že stabilizátor mění svoji hloubku po délce, tak z důvodu zvýšení přesnosti nahrazuje hodnota 0,4 ve vztahu pro výpočet $S_{nh\ vop}$ hodnotu C_{stab} . Tato hodnota je hloubka v místě střední aerodynamické tětiny (dále SAT). Její poloha byla určena (viz Obr. 3.3).



Obr. 3.3 – určení SAT (zdroj: autor)

Určení měrných veličin:

Matematický model počítá s měrnými veličinami, proto byla vypočítána měrná hmotnost VK a VOP, měrný statický moment VK a VOP, měrný moment setrvačnosti VK a VOP. Tyto hodnoty byly vztaženy na metr délky. Výpočty byly stanoveny dle metodiky [2].

Měrná hmotnost:

$$\bar{m} = \frac{m}{L} \left[\frac{kg}{m} \right]$$

Měrný statický moment:

$$\bar{S}_{NH} = \frac{S_{nh}}{L} \left[\frac{kg}{m} * m \right]$$

Měrný moment setrvačnosti:

$$\bar{J}_{NH} = \frac{J_{nh}}{L} \left[\frac{kg}{m} * m^2 \right]$$

Výsledné hodnoty jsou pro VOP uvedeny v *Tab. 3.2* a hodnoty pro VK jsou uvedeny v *Tab. 3.3*. Souhrn všech výsledných hodnot vstupujících do matematického modelu pro flutterovou analýzu je uveden v PŘÍLOZE 1.

γ	m	S_{nh}	J_{nh}	\bar{m}	$\overline{S_{NH}}$	$\overline{J_{NH}}$
0,0	5,966	1,969	0,341	2,420	0,799	0,138
0,8	5,966	1,969	0,341	2,420	0,799	0,138
1,1	5,966	1,969	0,341	2,420	0,799	0,138

Tab. 3.2 – výsledné hodnoty pro VOP (zdroj: autor)

γ	\bar{m}	$\overline{S_{oo}}$	$\overline{J_{oo}}$
0,0	0,789	0,070	0,008
0,8	0,789	0,070	0,008
1,1	0,789	0,070	0,008

Tab. 3.3 – výsledné hodnoty pro VK (zdroj: autor)

K výslednému momentu VK byl přičten přidavný moment setrvačnosti (viz kapitola 3.1.1) pomocí vzorce:

$$J_k = J_{oo} + \Delta J \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^2]$$

3.1.1 Vyhodnocení přídavného momentu setrvačnosti

U kormidel je zapotřebí stanovit efekty přídavného momentu setrvačnosti ΔJ [kg.m²], které korigují vliv trasy řízení od řídicí páky až po kormidlo. Zohledňuje setrvačné účinky pohybujících se hmot táhel a rotujících pák. Vyhodnocení bylo provedeno dle metodiky [1], [2].

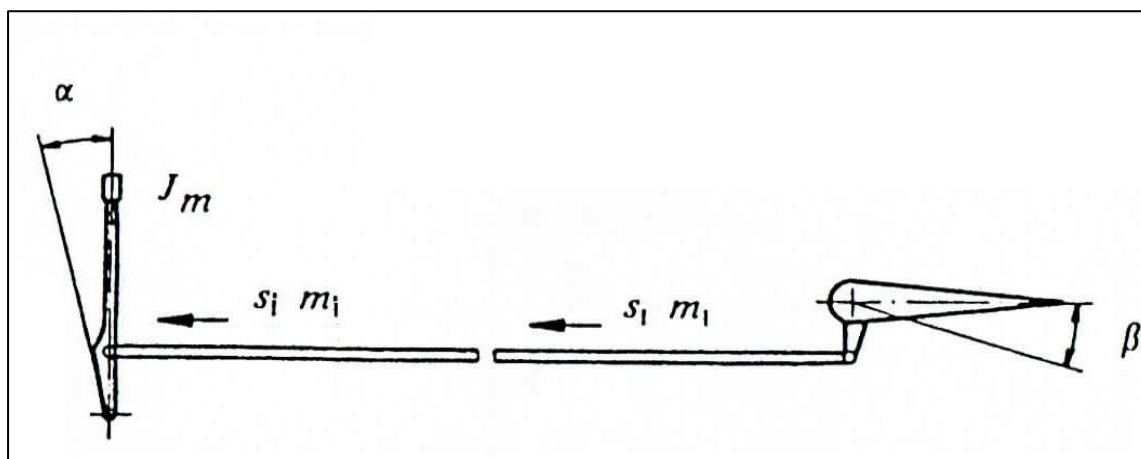
Přídavný moment setrvačnosti se určí dle vzorce:

$$\Delta J = \sum \left(m_i \cdot \left(\frac{ds_i}{d\beta} \right)^2 + J_m \cdot \left(\frac{d\alpha_m}{d\beta} \right)^2 \right)$$

Kde:

$\left(\frac{ds_i}{d\beta} \right)$ - převodová funkce pro posuvové členy [m/rad]. Tato funkce uvádí poměr posuvu těžiště i-tého táhla ku výchylce VK.

$\left(\frac{d\alpha_m}{d\beta} \right)$ - převodová funkce pro rotační členy [rad/rad]. Tato funkce uvádí poměr natočení i-té páky ku výchylce VK.

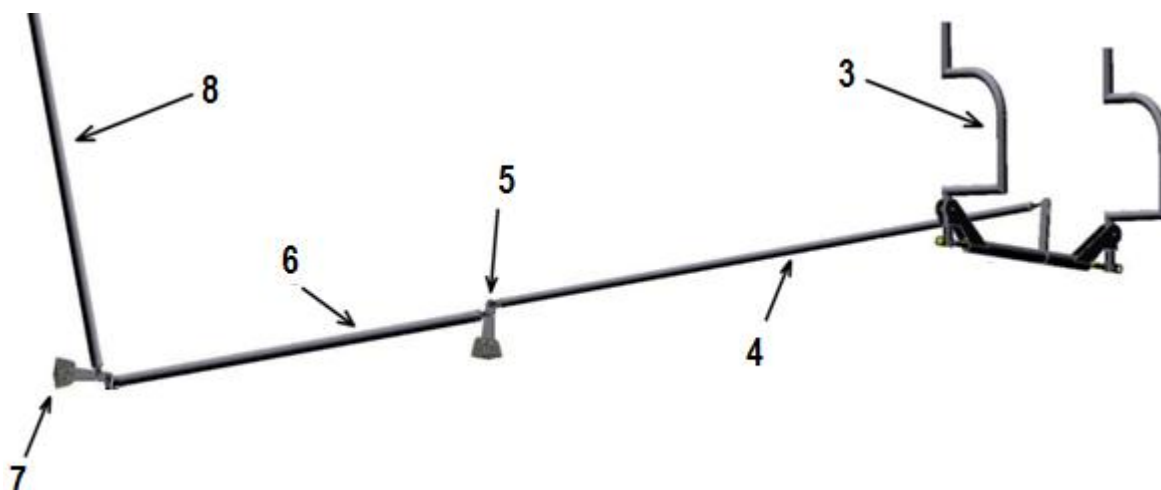


Obr. 3.4 – symbolika trasy řízení (zdroj [3])

Hodnoty pro určení ΔJ (viz *Tab. 3.4*). Vzhledem k tomu, že VK je monolitní a neskládá se z poloploch, tak se nesymetrické buzení navzájem vyruší a nepřenáší se do systému řízení žádné kmitání, proto ΔJ nesymetrické je 0. Pro blokované řízení nelze ΔJ určit výpočtem, ale jedná se o odhad podle systému řízení. ΔJ blokované bylo stanoveno na 50% ΔJ volné. Výsledné hodnoty pro ΔJ (viz *Tab. 3.5*). Označené komponenty trasy řízení VK (viz *Obr. 3.5*). Foto celé sestavy řízení dodané výrobcem letounu je v PŘÍLOZE 2 a výkresy jednotlivých komponentů trasy řízení dodané výrobcem letounu včetně hmotností a momentů setrvačností k ose otáčení jsou v přílohách pod čísly uvedenými (viz *Tab. 3.4*).

	č. výkresu	m	ds	d β	J _{oo}	d α	$\left(\frac{ds_i}{d\beta}\right), \left(\frac{d\alpha_m}{d\beta}\right)$	číslo přílohy a pozice
táhlo VK přední	PA 3 523	0,445	0,063	0,628			0,00448	4
táhlo VK zadní	PA 3 881	0,928	0,063	0,628			0,00934	6
svislé táhlo VK	PA 3 831	1,761	0,05	0,628			0,01116	8
řídící páka + předloha řízení	PA 3 641 PA 3 621			0,628	0,01	0,78	0,01543	3
pomocná páka	PA 3 521			0,628	0,0002987	0,559	0,00024	5
páka VK	PA 3 861			0,628	0,0001832	0,646	0,00019	7

Tab. 3.4 – hodnoty pro určení ΔJ (zdroj: autor)

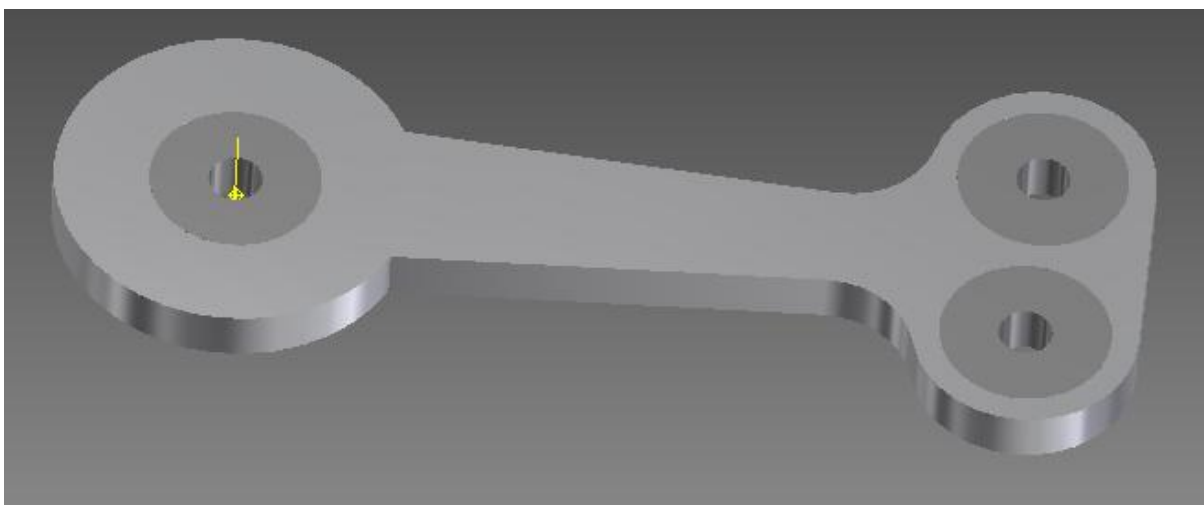


Obr. 3.5 – trasa řízení (zdroj: autor)

kormidlo	řízení	symetrické tvary		nesymetrické tvary	
		ΔJ (kg*m ²)		ΔJ (kg*m ²)	
výškovka	volné	0,04084		0	
	blokové	0,02042		0	

Tab. 3.5 – výsledné hodnoty ΔJ (zdroj: autor)

K ověření správnosti hodnot momentů setrvačnosti byl pro kontrolu vymodelován kontrolní vzorek pomocné páky poz. 5. Model je pouze hrubý a neodpovídá přesným rozměrům a materiálovému složení. Z výsledku je patrné, že se hodnoty řádově rovnají (viz Obr. 4.6 a 4.7), osa rotace y.



Obr. 3.6 – model pomocné páky (zdroj: autor)

Vlastnosti setrvačnosti

Momenty hmotnosti

Ixx
Vypočteno pomocí negativního integrálu

Ixy
Iyy

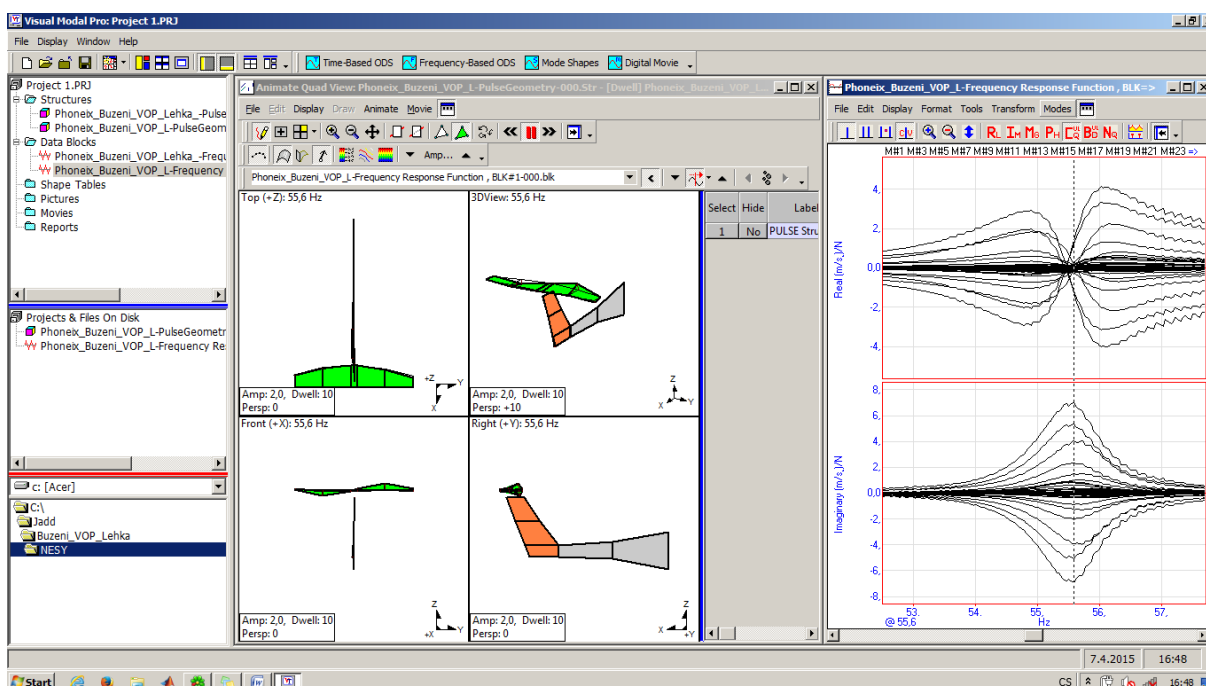
Ixz
Iyz
Izz

Obr. 3.7 – geometrické charakteristiky modelu (zdroj: autor)

3.2 Vyhodnocení vlastních frekvencí konstrukce

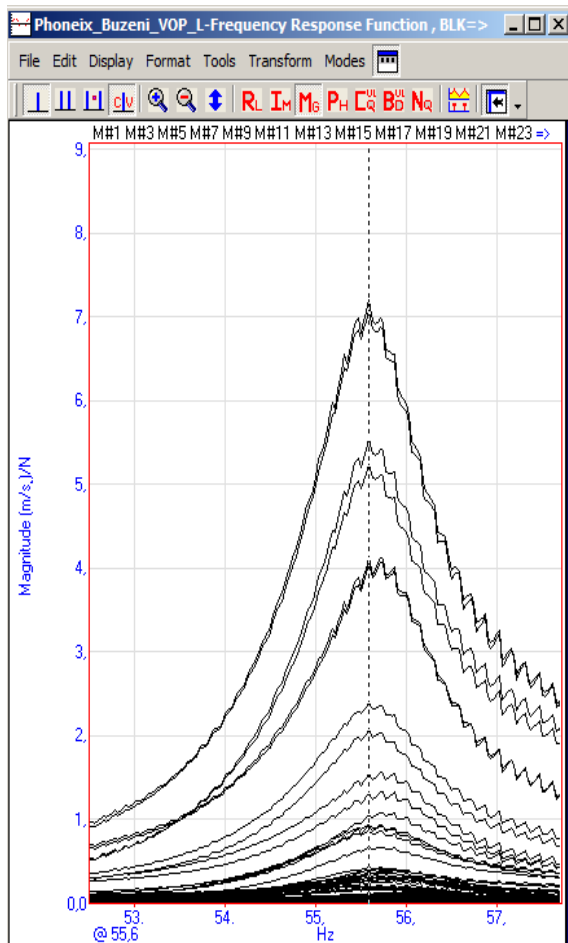
K vyhodnocení frekvenčních charakteristik byl použit program MeScopeVES. Vstupními hodnotami tohoto programu jsou soubory s již zpracovanými daty z akcelerometrů, siloměrů a soubory s geometrií, obsahující geometrické údaje vyhodnocované části letounu (viz. Obr 3.8), kde v levém okně je zobrazovaná geometrie a v pravém je zobrazován průběh přenosové funkce. V tomto případě jsme vyhodnocovali průběh buzení SOP, VK a VOP.

Data byla pořizována pro těžkou a lehkou konfiguraci, pro symetrickou a nesymetrickou variantu buzení. V případě VK pro volné a pro blokové řízení.

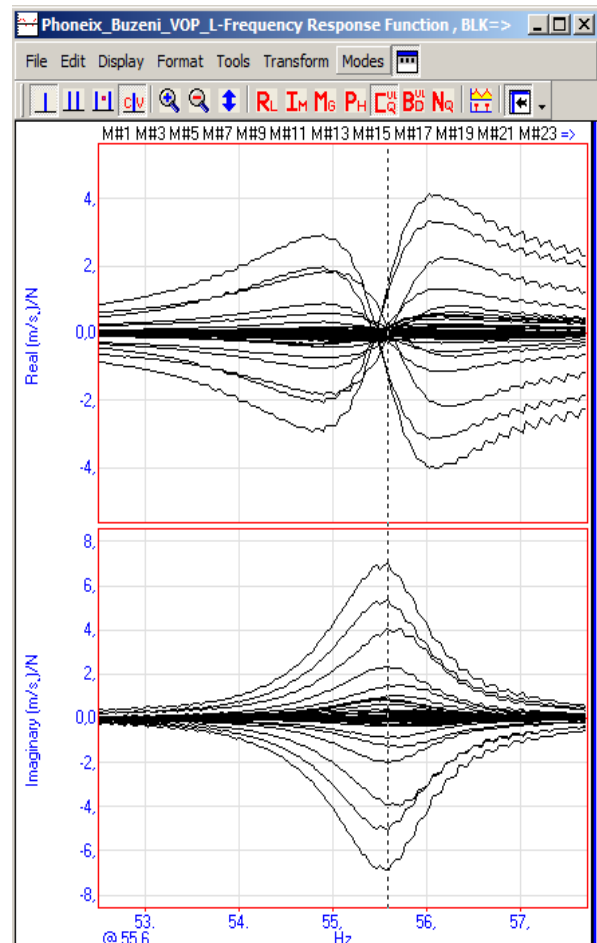


Obr. 3.8 – zobrazení geometrie a přenosové funkce (zdroj: autor)

Podezřelá oblast vzniku vlastní frekvence je tam, kde magnituda nabývá ostrého maxima (viz Obr. 3.9). Pro vlastní frekvenci je charakteristické, že reálná složka přenosové funkce se rovná 0 a imaginární složka nabývá maxima (viz Obr. 3.10), reálná a imaginární část jsou posunuty o 90° .



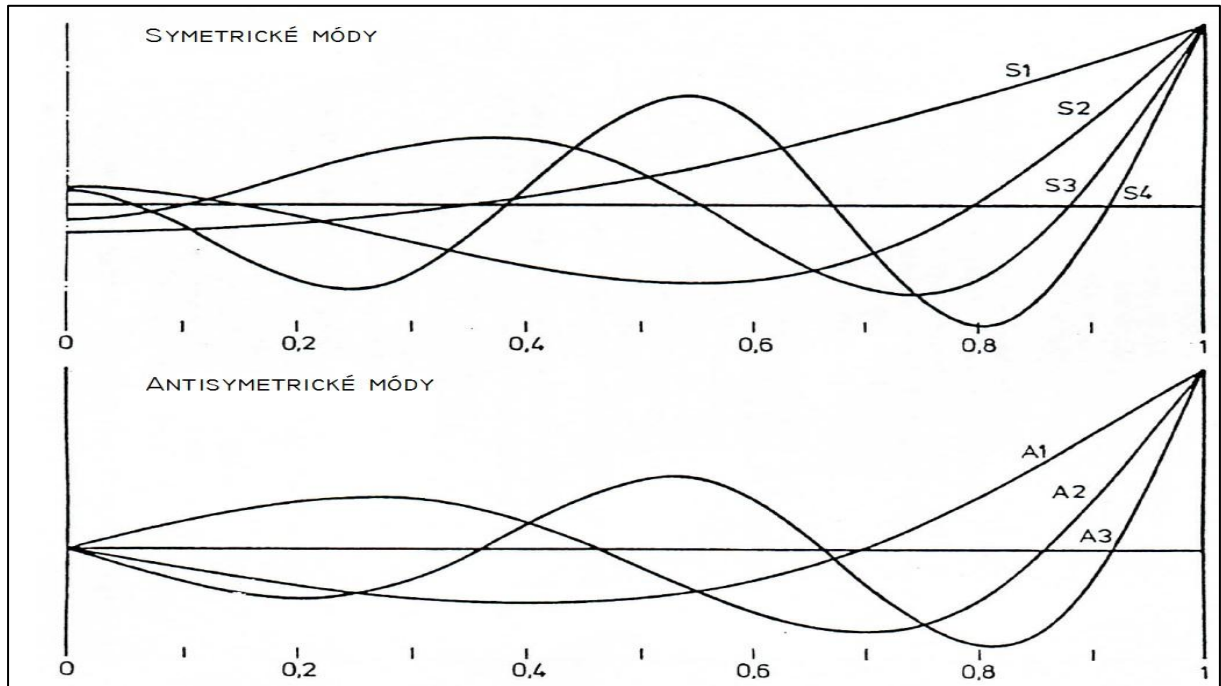
Obr. 3.9 – extrém magnitudy (zdroj: autor)



Obr. 3.10 – vlastní frekvence (zdroj: autor)

Pro každou identifikovanou vlastní frekvenci byl určen i vlastní tvar kmitání, ty jsou uvedené v příslušné tabulce pro každou frekvenci. Vyhodnocení vlastních frekvencí VK blokové řízení (viz Tab. 3.6), VK volné řízení (viz Tab. 3.7), VOP lehká konfigurace (viz Tab. 3.8), VOP těžká konfigurace (viz Tab. 3.9), SOP lehká konfigurace (viz Tab. 3.10) a SOP těžká konfigurace (viz Tab. 3.11).

Druhy ohybových módů a jejich charakteristika je patrná (viz Obr. 3.11).



Obr. 3.11 – ohybové módy (zdroj: [3])

Symetrické buzení				Nesymetrické buzení			
Mód	Frekvence	Tvar	Tlumení	Mód	Frekvence	Tvar	Tlumení
1.	19,2	rotace VK.	0,057	1.	40,9	osový překmit	0,024

Tab. 3.6 – Vlastní frekvence VK blokové (zdroj: autor)

Symetrické buzení				Nesymetrické buzení			
Mód	Frekvence	Tvar	Tlumení	Mód	Frekvence	Tvar	Tlumení
1.	24,6	rotace VK.	0,024	1.	41,4	1. ohybový mód	0,032

Tab. 3.7 – Vlastní frekvence VK volné (zdroj: autor)

Symetrické buzení				Nesymetrické buzení			
Mód	Frekvence	Tvar	Tlumení	Mód	Frekvence	Tvar	Tlumení
1.	10,5	1. ver.ohyb trupu	0,0072	1.	6,97	stran. ohyb trupu	0,018
2.	12,7	2. ver.ohyb trupu	0,024	2.	12,3	torze trupu	0,071
3.	36,4	2. ohybový mód	0,021	3.	13,8	ohyb trupu	0,043
4.	40,2	1. ohybový mód	0,006	4.	55,6	1. ohybový mód	0,011
				5.	80,9	1. ohybový mód	0,047

Tab. 3.8 – Vlastní frekvence VOP lehká (zdroj: autor)

Symetrické buzení				Nesymetrické buzení			
Mód	Frekvence	Tvar	Tlumení	Mód	Frekvence	Tvar	Tlumení
1.	10,4	1. ver.ohyb trupu	0,0095	1.	6,75	stran. ohyb trupu	0,013
2.	12,5	2. ver.ohyb trupu	0,028	2.	7,87	boční ohyb trupu	0,013
3.	36,7	2. ohybový mód	0,019	3.	13,2	stran. ohyb trupu	0,027
4.	40,2	1. ohybový mód	0,0049	4.	55,8	1. ohybový mód	0,011
				5.	80,9	1. ohybový mód	0,0062

Tab. 3.9 – Vlastní frekvence VOP těžká (zdroj: autor)

Mód	Frekvence	Tvar	Tlumení
1.	6,75	kývání SOP	0,0075
2.	8,22	stran. ohyb trupu	0,01
3.	12,6	torze trupu	0,02
4.	22,5	krut SOP	0,024
5.	81,9	stran. ohyb trupu	0,01

Tab. 3.10 – Vlastní frekvence SOP lehká (zdroj: autor)

Mód	Frekvence	Tvar	Tlumení
1.	6,62	stran. ohyb trupu	0,0075
2.	7,81	stran. ohyb trupu	0,013
3.	13,5	2. oh. mód VOP	0,015
4.	22,9	stran. ohyb trupu	0,011

Tab. 3.11 – Vlastní frekvence SOP těžká (zdroj: autor)

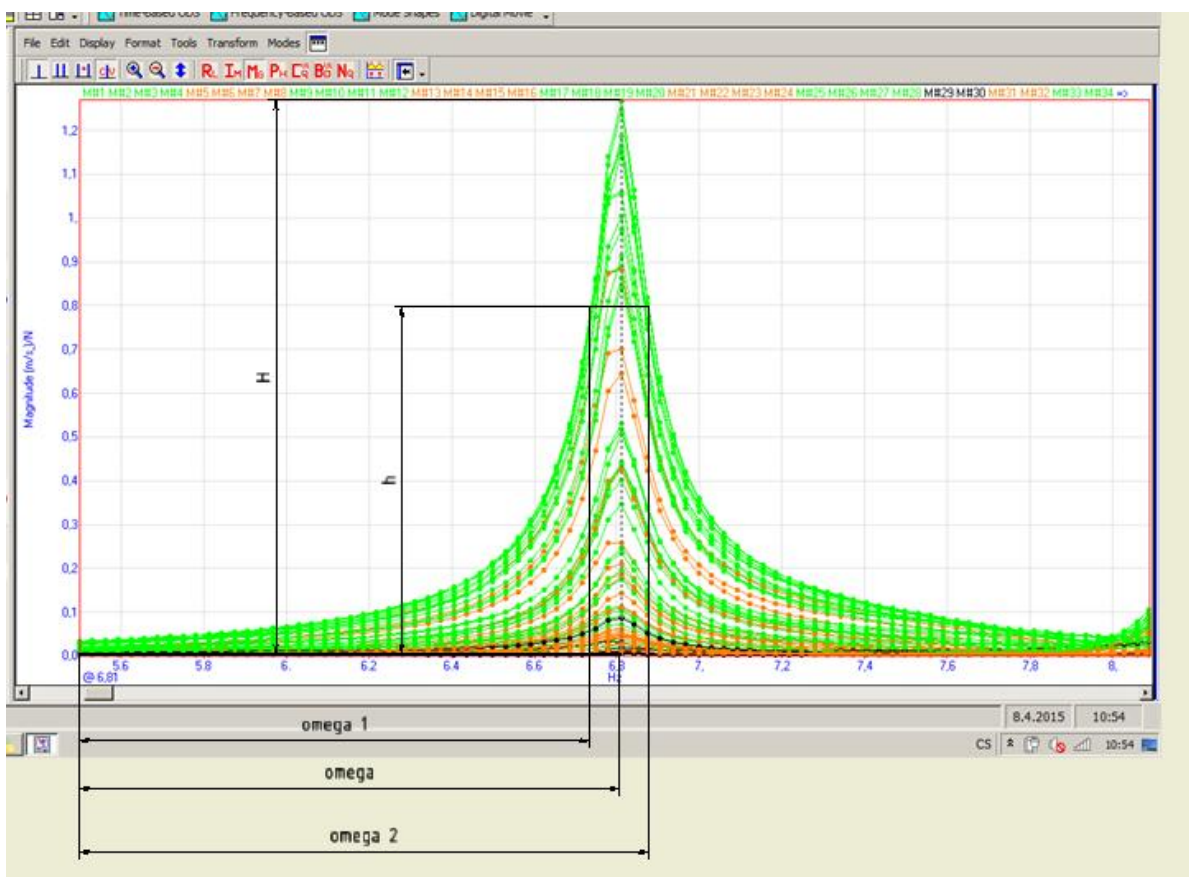
3.3 Vyhodnocení konstrukčního tlumení

Každá reálná soustava deformační kmity postupně tlumí. V opačném případě by po vybuzení silou soustava harmonicky kmitala do nekonečna i po odeznění budící síly. Toto tlumení nazýváme konstrukční tlumení. Postup konstrukčního tlumení byl vypracován dle [4]. Při výpočtu konstrukčního tlumení byl použit vzorec:

$$D = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2 * \omega}$$

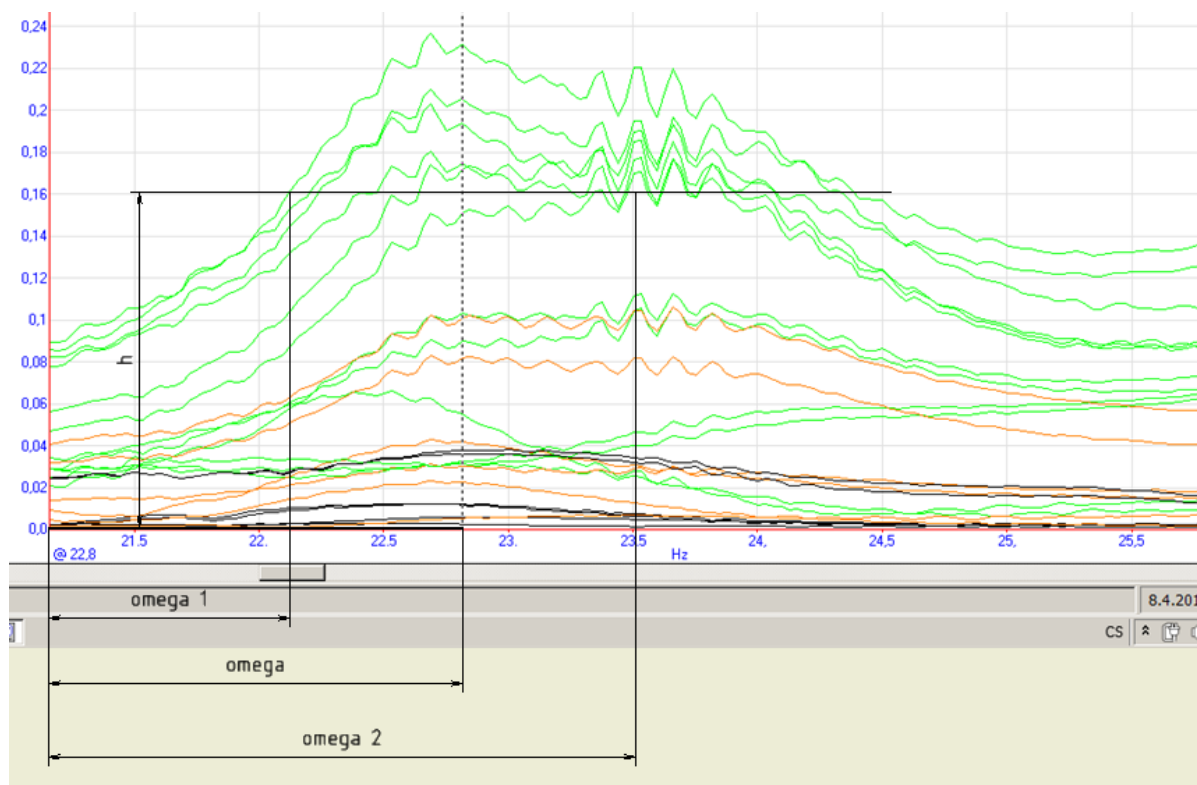
Kde $\omega_{1,2}$ se odečte z funkce magnitudy (viz *Obr. 3.12*). Výška h se určí dle vztahu:

$$h = \frac{H}{\sqrt{2}}$$



Obr 3.12 – určení $\omega_{1,2}$ (zdroj: autor)

Tento model předpokládá symetrický průběh funkce (viz *Obr. 3.12*). Pokud je funkce nesymetrická, tak se symetrie předpokládá a hodnota ω_2 se odečítá ve stejné vzdálenosti od ω jako ω_1 od ω (viz *Obr. 3.13*).

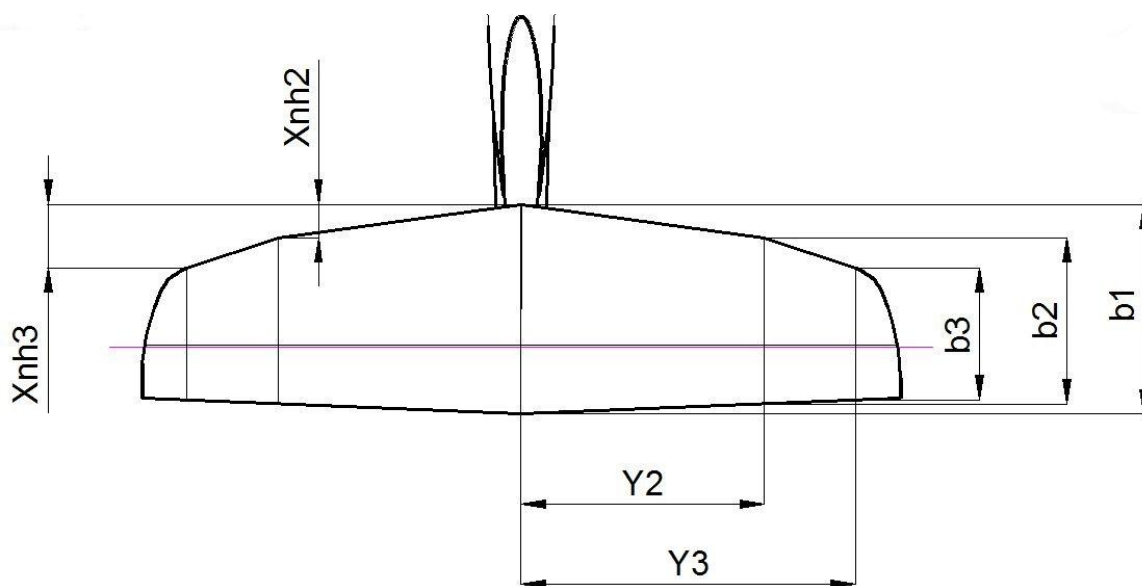


Obr. 3.13 – nesymetrický průběh tlumení (zdroj: autor)

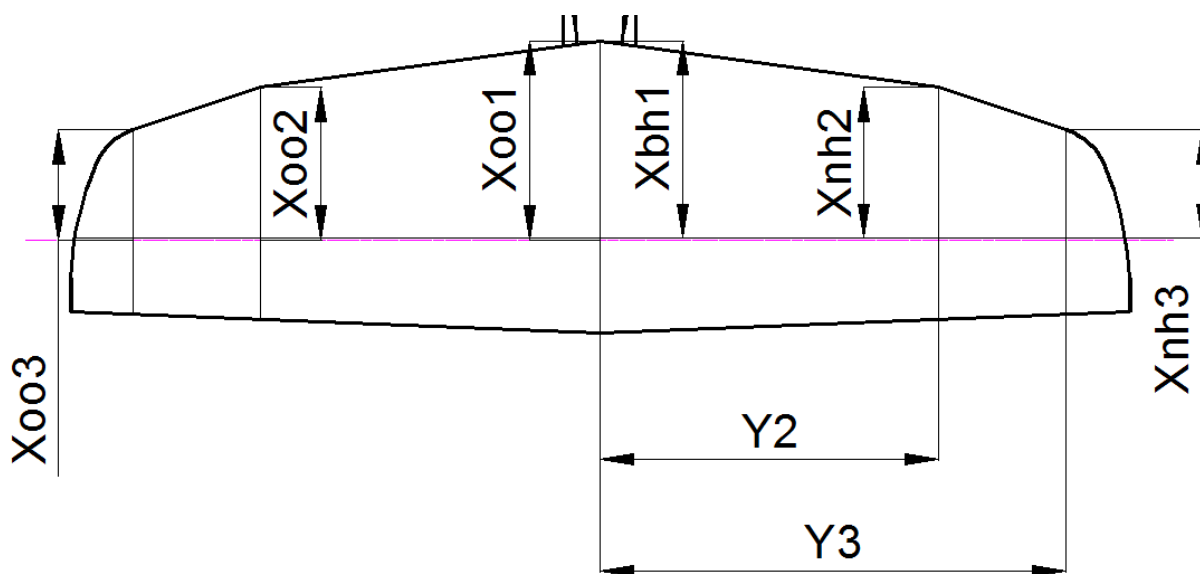
Vyhodnocení tlumení pro každou vlastní frekvenci je pro VK blokové řízení (viz *Tab. 3.6*), VK volné řízení (viz *Tab. 3.7*), VOP lehká konfigurace (viz *Tab. 3.8*), VOP těžká konfigurace (viz *Tab. 3.9*), SOP lehká konfigurace (viz *Tab. 3.10*) a SOP těžká konfigurace (viz *Tab. 3.11*).

4. Příprava geometrie pro výpočet flutteru

Do matematického modelu pro výpočet flutterové odolnosti vstupují tyto geometrické charakteristiky VOP: polohy řezů VOP y [m] od podélné osy letounu, hloubka profilu b [m] v místě daného řezu. Poloha náběžné hrany VOP $X_{nh\ vop}$ [m], poloha náběžné hrany VK $X_{nh\ vk}$ [m], poloha osy otáčení VK $X_{oo\ vk}$ [m]. Zakótované rozměry jednotlivých hodnot VOP a stabilizátoru (viz Obr. 4.1), rozměry VK (viz Obr. 4.2). Hodnoty jsou v tabulkové formě v PŘÍLOZE 1.



Obr. 4.1 – geometrické charakteristiky VOP



Obr. 4.2 – geometrické charakteristiky VK

5. Závěr

První část této bakalářské práce se zabývá postupem získávání hodnot potřebných k vyhodnocení hmotových charakteristik. Byly zde měřeny základní charakteristiky stabilizátoru, výškového kormidla a vodorovné ocasní plochy jako celku. Poté byly měřeny odezvy konstrukce na buzení harmonickou silou. Tyto odezvy byly převáděny na přenosovou funkci vhodnou k dalšímu zpracování. Všechny činnosti z této části probíhaly na místě u výrobce letounu.

V druhé části jsou veškerá data vyhodnocena. Stanoveny hmotové a modální charakteristiky vodorovné ocasní plochy, přičemž byl zahrnut i vliv od svislé ocasní plochy a trasy řízení.

Ve třetí části je řešena příprava geometrických charakteristik. Tyto charakteristiky, spolu s hmotovými a modálními, jsou vstupními hodnotami pro matematický model flutterové odolnosti letecké konstrukce.

6. Přehled použité literatury

- [1] Sommer Tomáš a Kratochvíl Aleš: Experimentální zjištění hmotnostních charakteristik pevných ploch a kormidel, ULT ČVUT v Praze, 2013.
- [2] Konvalinka Michael: Metodický pokyn pro stanovení hmotnostních charakteristik leteckých konstrukcí, CLKV ČVUT v Praze, 2009.
- [3] Stender Walter and Kiebling Fritz: Aeroelastic Flutter Prevention in Gliders and Small Aircraft, DLR, Gottingen 1991
- [4] Svatomír Slavík: Aeroelasticita leteckých konstrukcí, vydavatelství ČVUT, Praha 1996. ISBN 80-01-01415-0.

7. Přílohy

Příloha č. 1 – výsledné geometrické a hmotnostní charakteristiky (zdroj: autor)

	souřadnice	hloubka	souřadnice	poloha NH	souřadnice	poloha osy otáčení
VOP	y [m]	b [m]	y [m]	X _{NH VOP} [m]		
	0,000	0,691	0,000	0,000		
	0,800	0,545	0,800	0,110		
	1,100	0,435	1,100	0,210		
VK			y [m]	X _{NH VK} [m] (od VOP)	y [m]	X _{oo} [m]
			0,000	0,465	0,000	0,470
			0,800	0,355	0,800	0,360
			1,100	0,255	1,100	0,260

	souřadnice	měrná hmotnost	souřadnice	měrný statický moment	souřadnice	měrný moment setrvačnosti
VOP	y [m]	m VOP [kg/m]	y [m]	S _{NH VOP} [kg.m/m]	y [m]	J _{NH VOP} [kg.m ² /m]
	0,000	2,4200	0,000	0,7990	0,000	0,1380
	0,800	2,4200	0,800	0,7990	0,800	0,1380
	1,100	2,4200	1,100	0,7990	1,100	0,1380
VK	y [m]	m VK [kg/m]	y [m]	S _{oo VK} [kg.m/m]	y [m]	J _{oo VK} [kg.m ² /m]
	0,000	0,7890	0,000	0,0700	0,000	0,00800
	0,800	0,7890	0,800	0,0700	0,800	0,00800
	1,100	0,7890	1,100	0,0700	1,100	0,00800

Příloha č. 2 – trasa řízení (zdroj: autor)

