

## Oponentní posudek disertační práce

Disertant: Ing. Tomáš Sommer

Název práce: Analýza vlivu pilota na modální parametry soustavy řízení lehké letecké konstrukce

### 1. Charakteristika posuzované disertační práce

K posouzení byla předložena práce v rozsahu 177 číslovaných stran včetně příloh, 288 obrázků a 29 tabulek, přičemž hlavní část práce má rozsah 71 stran. Téma disertace je věnováno problematice letecké aeroelasticity, zaměřené do oblasti lehkých sportovních letadel (LSA). Konkrétně se jedná o posouzení vlivu pilota na modální parametry konstrukce, které jsou jedním ze základních vstupních parametrů pro výpočet dynamické stability (flatru). V úvodní části je proveden rozbor současného stavu řešené problematiky. V další části je potom popsán experiment pro získání dat vlastností pilota pro sestavení matematického modelu. Následuje odvození modelu systému pilota a jeho začlenění v rámci celého výpočtu. Praktická aplikace je dokumentována na příkladu výpočtu flatru konkrétního letounu kategorie LSA s vyhodnocením vlivu začlenění pilota do výpočtu. Závěrečná část práce se věnuje zhodnocení a důsledkům pro obor a praxi.

### 2. Dosažení stanoveného cíle

Cíle disertační práce jsou definovány jako 1) prokázat vliv pilota na dynamickou stabilitu konstrukce letounu s dílčími cíli a) experimentálně stanovit dynamické vlastnosti pilota, b) nalézt vhodný matematický popis a c) využít model pro výpočet flatru a 2) připravit návrh inovace zkušební metodiky pozemních zkoušek dynamické stability letounu kategorie LSA. Cíl č. 1 kopíruje obsah práce a lze jej proto považovat za splněný. Byl realizován experiment a odvozen matematický model, který byl následně zahrnut do výpočtu flatru. Cíl č. 2 považuji za formální a nadbytečný, nicméně i tento lze považovat za splněný stručným návrhem inovace metodiky pozemních rezonančních zkoušek.

### 3. Úroveň rozboru současného stavu řešené problematiky

Rozbor stavu řešené problematiky zahrnuje rozbor požadavků jednotlivých předpisů z hlediska průkazu odolnosti vůči flatru a dále je uveden popis praxe modálních zkoušek u letounů kategorie LSA. Následně je uveden rešeršní popis modelu pilota. Popisné kapitoly jsou doplněny řadou odkazů na literaturu. Rozbor řešené problematiky je proveden poněkud stručně, což je zřejmě dáno skutečností, že tato problematika není v literatuře příliš frekventovaná. Zejména se to týká oblastí vyšších frekvencí, pro které dostupná literatura neexistuje. Úroveň rozboru stavu řešené problematiky lze proto považovat za akceptovatelnou. Poněkud postrádám teoretický popis principu použitých metod pro výpočet flatru a nestacionární aerodynamiky, nejlépe v rámci příloh.

### 4. Teoretický přínos

Teoretický přínos práce spočívá zejména v odvození matematického modelu pilota. Teoretická část zahrnuje výpočet svalové činnosti s aplikací standardního Hillova reversního modelu, který ovšem nebyl následně využit z důvodu velkého rozptylu výsledných hodnot. Dále se zde jedná o vnější popis frekvenčních vlastností pilota prostřednictvím stavového modelu, vč. jeho inverzního popisu.

## 5. Praktický přínos

Praktický přínos práce spočívá v simulaci vlivu pilota na reálnou strukturu letounu kategorie LSA. Došlo zde k propojení systémů trasy řízení a vlivu pilota formou zpětnovazební smyčky. Samotný výpočet flatru je pak již proveden s využitím dříve vytvořeného programu. Z výsledků vyplývá nezanedbatelný vliv pilota na modální charakteristiky systému, zejména pak tlumení. Problémem však zůstává spolehlivost stanovení charakteristik pilota a s tím související spolehlivost výsledků výpočtu, viz odst. 9. Je zřejmé, že konečné začlenění vlivu pilota do výpočtu flatru např. pro účely certifikace letadla bude ještě vyžadovat značné úsilí.

## 6. Vhodnost použitých metod a jejich aplikace

V rámci řešené problematiky bylo využito přístupu experimentálního i analytického. Použité experimentální vybavení, metody měření či analytické přístupy lze považovat za standardní. Závěrečný výpočet flatru byl proveden pomocí dříve sestaveného a již v praxi prověřeného výpočetního nástroje. Určité výhrady k aplikaci použitých metod a přístupů jsou uvedeny v odst. 9, kde jsou rovněž zmíněny některé nejasnosti, které by měl disertant v rámci obhajoby vysvětlit.

## 7. Prokázání znalostí v oboru

Aeroelasticita je náročná mezioborová disciplína, která vyžaduje znalosti jak z oboru aerodynamiky, zejména nestacionární, tak i z klasické dynamiky. Presentovaná úloha v sobě zahrnuje navíc také obor biomechaniky. Zvládnutím presentované úlohy disertant prokázal široké znalosti v těchto oblastech. Rovněž nechybějí standardní inženýrské dovednosti. Publikáční historie zahrnuje spoluautorství 11 technických zpráv, týkajících se analýzy flatru letadel kategorie LSA z období od roku 2012. Lze proto konstatovat, že disertant se oborem aeroelasticity zabývá již dlouhodobě a že prokázal dostatečnou úroveň znalostí oboru.

Publikace výsledků disertace zahrnuje pět položek, z nichž však za relevantní lze považovat pouze položky dvě, a to příspěvky na konferencích [56] a [59]. Publikace [55] z roku 2013 pojednává o modálních zkouškách letadel kategorie LSA a s problematikou disertace přímo nesouvisí. Dále jsou uvedeny dva články v odborných časopisech ([57] a [58]), které však dosud nebyly vydány a lze usuzovat, že ani neprošly recenzním řízením. K uvedeným třem publikacím proto nelze přihlídnout.

## 8. Formální úroveň

Předkládaná práce obsahuje všechny potřebné náležitosti, kladené na disertační práce či technické zprávy obecně. Jednotlivé kapitoly jsou členěny přehledně a logicky. Vhodné je umístění grafických zobrazení výsledků rozsáhlých experimentů a výpočtů do příloh. Tím je zaručena kompaktnost a přehlednost hlavní části. Určité formální nedostatky, překlepy, apod. lze nalézt vždy. Zejména je třeba vytknout velmi nekompletní nomenklaturu použitých symbolů, terminologické nepřesnosti a nečitelné popisky os u některých obrázků v textové části. Některé formální nedostatky jsou dále uvedeny v odst. 9.

## 9. Dotazy, poznámky a připomínky

Literatura [2], je uvedeno AC 23.626, má být patrně 23.629

Kap. 2, v souvislosti s letouny kategorie UL a LSA se uvádějí spíše národní předpisy (UL-2, LTF, apod.), dále např. FAR-LSA, CS-VLA, které jsou v práci dále citovány, nikoliv předpisy FAR/CS 23.

Kap. 2.1, v překladu předpisu je uvedeno „letové vibrační zkoušky“, lépe by bylo „letové zkoušky flatru“.

Je zmiňován program „Flutter 2D“ a „Flutter 3D“, patrně se jedná o překlep.

Tab 2, chybně uvedena jednotka (rozsah) u siloměru (9800 g, má být N).

Str. 52 – uvedena „tzv. Kiesslingová metodika“, patrně metodika z práce: Kiessling, F.: Aeroelastic Flutter Prevention in Gliders and Small Aircraft, DLR, 1991.

Str. 34 – „rychlá fourierová transformace“, správně Fourierova.

Str. 10 – číslo 32768 představuje počet vzorků v časové oblasti, rozlišení je  $\frac{1}{1024} \text{ s}^{-1}$ .

Obr. 2, podle grafu byla amplituda konstantní (1V) pouze na nízkých frekvencích, vysoké frekvence amplitudově kolísají. Proč?

Kap. 4, jaká úroveň síly odpovídá amplitudě budícího signálu 1V. Jaká je výchylka vibrátoru. Jaké jsou citlivosti snímačů.

Kap. 6.1, jaké parametry FFT byly nastaveny. Jaký typ průměrování byl použit. Jak byla konstruována spektra  $G_{AB}$ ,  $G_{AA}$ .

Obr. 31, graf koherence indikuje nízkou úroveň koherence pro nižší frekvence.

Kap. 7, výpočet flatru: u symetrických tvarů dochází u případů 5\_4\_1\_2V a 6\_4\_2\_1V vlivem pilota ke zvýšení počtu módů o jeden. Čím je to způsobeno. Jaké jsou vlastní tvary těchto módů, čím se liší. Pozn.: nízká kritická rychlost flatru (-20.4% a -27.1% resp. -25% a -24.8%) oproti volnému řízení i ostatním případům, zahrnujícím pilota je zde patrně dána přiblížením vyšší z obou frekvencí k módu vertikálního ohybu trupu.

Kap. 7, výpočet flatru: u antisymetrických tvarů se kmitání účastní pouze malá část řídicího systému (spojení obou polovin výškovky), tudíž je vliv systému řízení (a tedy i pilota) minimální. Prezentované výsledky (tab. 22 a 23) uvádějí vliv pilota nulový nebo minimální, avšak s výjimkou dvou případů (5\_4\_1\_1V – vliv -34% a 5\_4\_2\_2V – vliv 16.2%). Čím je to způsobeno. Pozn.: patrně se zde jedná o flatr směrovky.

## 10. Závěr

Disertační práce je přínosem v aplikaci problému biomechaniky do oblasti letecké aeroelasticity. Disertant prokázal schopnost orientace ve složitém interdisciplinárním technickém oboru. Předkládá nástin metodiky zahrnutí vlivu pilota do procesu výpočtu flatru letounu kategorie LSA, ačkoliv je zřejmé, že její aplikace v technické praxi dosud není aktuální a bude ještě vyžadovat značné úsilí.

**Disertační práci doporučuji k obhajobě.**

V Zápěch dne 20.11.2019

Ing. Jiří Čečrdle, Ph.D.  
Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.  
Praha – Letňany