ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta strojní
Ústav letadlové techniky

doc. Ing. Svatomír Slavík, CSc.
Karlovo nám. 13
121 35 Praha-2
tel: 224357227
e-mail: svatomir.slavik@fs.cvut.cz

Oponentský posudek disertační práce

Název: **Load State of an Aircraft with an Elastic Wing**

Autor: **Ing. Pavel Schoř**

Rozbor práce

Práce předložená v anglické notaci v rozsahu 10ti kapitol (65 stran) je zaměřena na oblast statické nízkorychlostní letecké aeroelasticity, specificky na přerozdělení zatížení vlivem deformace velmi poddajných štíhlých křídel větroňů. Je navržen a realizován výpočtový kód, který je ověřován řešením odezev deformované konstrukce modelu větroně jednak pro případy výchylky výškového kormidla, jednak pro průlet standardním modelem poryvu.

V *Úvodu* (*Kapitola 1*) autor poukazuje u případu destrukční poruchy letounu Helios na význam komplexního návrhu konstrukce velmi štíhlých nosných ploch s ohledem na zpětnou vazbu deformace na aerodynamické zatížení a vymezuje tak cíle disertační práce - vytvořit efektivní návrhový model výpočtu aerodynamického zatížení u vysoce deformovatelných vztlakových ploch s větší štíhlostí, primárně cílený na kategorii větroňů. Prezentovaná motivace a formulovaný cíl jsou opodstatněné.

Kapitola 2 se zabývá stručným principiálním nastíněním matematicko-fyzikálních modelů jednotlivých interakčních oblastí statické aeroelasticity – oblasti proudění a strukturální oblastí. Kapitola je doplněna o pohybové rovnice mechaniky letu.

Kapitola 3 specifikuje matematicko-fyzikální model proudění volbou potenciálního ideálního proudu s návrhem panelové metody po povrchu křídla. Model ideálního proudu navržené panelové metody je rozšířen o možnost postihnout reálný proud pomocí dvourozměrného modelu mezní vrstvy. Se zvoleným modelem lze souhlasit, neboť představuje kompromis mezi minimalizací výpočtových nároků při požadavku dostatečné věrohodnosti získaných relevantních složek aerodynamických sil.

V *Kapitole 4* je nastíněn FEM nosníkový model a princip řešení nelineárních deformací pomocí Newton-Rapsonovy metody s proměnnou maticí tuhosti. Model je adekvátní řešené problematice. *Při obhajobě by doktorand měl blíže přiblížit metodiku výpočtu této tzv. tangenciální matice tuhosti.*

Kapitola 5 ve velmi omezeném rozsahu (½ strany i s nadpisem) schematicky charakterizuje integrační model pohybových rovnic Kapitoly 2. *Oponent považuje tuto kapitolu za příliš stručnou, zejména vzhledem k problematice nestacionárních aerodynamických sil – viz dále v posudku blíže specifikované "Otázky k tematické diskusi k práci při její obhajobě".*

Kapitola 6 popisuje interakční model aerodynamických sil vázaných na jednotlivé povrchové panely s FEM elastickým modelem nosníkového typu a současně prezentuje vývojové diagramy statického a dynamického výpočtového modelu. *U dynamického modelu, v návaznosti na výše uvedenou poznámku ke Kapitole 5, opět vyvstává otázka modelování reálné nestacionarity aerodynamických sil.*

Kapitola 7 charakterizuje a hodnotí vybrané metody a uživatelské programy zabývající se problematikou letecké výpočtové aeroelasticity. Oponent postrádá bližší srovnání s autorem navrženým modelem - *viz dále v posudku uvedené "Otázky k tematické diskusi k práci při její obhajobě".*

Kapitola 8 se zabývá ověřovacími výpočty aerodynamického a elastického bloku navrženého programu. Primárně je ověřována věrohodnost aerodynamického panelového modulu citlivostní analýzou na počet panelů jednak při výpočtu tlakového rozložení na profilu, dále pak výpočtem integrálních aerodynamických charakteristik křídla, a to i s ohledem na použitý2D model mezní vrstvy. Výsledky jsou uspokojivé ve vztahu k použitému matematicko-fyzikálnímu modelu proudového pole.

Předposlední *Kapitola 9* předkládá aplikační výsledky navrženého výpočtového schématu na aeroelastické modelové analýze modifikovaného větroně Standard Cirrus na rozpětí 21m. Byly šetřeny jednak odezvy na výchylku výškového kormidla, jednak odezva na průlet standardně definovaným kosinovým poryvem. Výsledky letounu s poddajným křídlem byly srovnávány s výsledky získané pro tuhý letoun a ukázány některé významné rozdíly v průbězích jednotlivých složek momentů aerodynamického zatížení. *Je však nutné poukázat na již výše zmíněné poznámky o vlivu časových změn na aerodynamické síly.*

Práci uzavírá závěrečná *kapitola 10* se souhrnným přehledem a autorovými návrhy na další vývoj v této oblasti pokročilého numerického výpočetního aeroelastického modelování. Se závěry i autorovými představami dalšího vývoje lze souhlasit a podpořit je.

Splnění navržených cílů.

Autor formuluje cíl své disertační práce jako:

návrh, sestavení a ověření výpočtové metodiky aerodynamického zatížení letounu s vysoce deformovatelnými křídly.

Konkrétně cíl dále upřesňuje požadavkem:

výpočtový kód realizovat na úrovni standardní výpočetní techniky umožňující praktickou vývojářskou aplikovatelnost – výpočtová opakovatelnost při variantních optimalizačních studiích.

Na základě předložené disertační práce lze konstatovat, že vytčený cíl autor splnil ve všech jeho bodech.

Hodnocení práce

Práce představuje přínos k řešení problematiky modelování aeroelasticity leteckých konstrukcí a jejich návrhu. Práce je primárně zaměřena na štíhlé vztlakové plochy s velkou deformační poddajností. *V práci však postrádám ucelený systematický přehled a rozbor stavu řešené problematiky.*

- ***Teoretický a praktický přínos***

Teoretický přínos spočívá v návrhu, algoritmizaci a verifikaci výpočetního aeroelastického modelu s nelineárním elastickým modelem pro stanovení přerozdělení zatížení na aerodynamické ploše v důsledku její deformace.

Praktický přínos spočívá zejména v realizaci výpočtového programu pro analýzu přerozdělení zatížení na konstrukci nosné plochy s vyváženým výběrem modelu proudění a strukturálního modelu poskytující výpočtově nenáročný program vhodný pro opakované optimalizační studie pro návrh těchto typů leteckých konstrukcí.

- ***Význam práce pro praxi a rozvoj oboru***

Výsledky práce se mohou přímo uplatnit v leteckém průmyslu České republiky, neboť stávající přístupy k řešení této problematiky spočívají převážně ve využívání komerčních softwarů, zejména NASTRANu, které nejsou vždy dostupné pro menší letecké výrobce, mezi něž patří i výrobci větroňů. Navíc, specifiku štíhlých, vysoce deformovatelných, nosných ploch řeší tyto programy jen omezeně.

Prezentované postupy, analýzy a výsledky tak rozšiřují poznatky ve vědním a technickém oboru aeroelasticita, a to nejen v rámci České republiky.

- ***Stylistická a grafická úroveň***

Práce má standardní uspořádání se všemi náležitostmi kladenými na disertační práce. Je zpracován seznam použité literatury s příslušnými odkazy v textu práce. Práce má odpovídající grafickou podporu v ilustračních obrázcích, vývojových grafech a zejména v grafické prezentaci výsledků.

Prezentované grafy výsledků výpočtů jsou však svou velikostí téměř na hraně přijatelné čitelnosti.

Práce je napsána v anglickém jazyce, což hodnotím jako přínos, neboť se tak zvyšuje potenciál jejího zahraničního rozšíření. Pro oponenta byla anglická forma dobře čitelná.

Otázky k tematické diskusi k práci při její obhajobě

1. Pro řešení dynamických stavů, jako je odezva na výchylku kormidla či průlet kosinovým poryvem, do pohybových rovnic vstupují obecně nestacionární aerodynamické síly. Na rozdíl od kvazistacionárních sil, jejichž změna je dána pouze časovou změnou konfigurace tělesa vůči proudu (např. časová změna úhlu náběhu), vykazují reálné nestacionární aerodynamické síly vůči těmto kvazistacionárním jistou "setrvačnost", což postihují v časové doméně konvoluční integrace (Duhamelův integrál). **Jak je problematika nestacionárních sil řešena při výpočtech uvedených dynamických odezev?**

2. Při hodnocení jednotlivých modelů a programů v Kapitole 7 autor sice charakterizuje standardně používaný program NASTRAN s aeroelastickým modulem, avšak blíže jej již neporovnává se svým výpočtovým kódem v oblasti řešených problémů štíhlých, velmi poddajných křídel, pro kterou byl tento kód navržen. **Jaké jsou přednosti či nedokonalosti autorova modelu při srovnání s NASTRANEM?**

3. V práci je pouze jeden odkaz na publikační činnost doktoranda. **Jaké jsou další odborné aktivity autora (publikace, prezentace, technické a výzkumné zprávy, technická díla,...)?**

Závěrečné zhodnocení

Předložená práce řeší trvale aktuální téma aeroelastické simulace, která dokáže dostatečně spolehlivě postihnout aeroelastické projevy leteckých konstrukcí. Je přínosem a pokrokem v této oblasti. Práce obsahuje řadu nových poznatků v teorii numerické aeroelastické simulace silně deformovatelných štíhlých vztlakových ploch a přináší praktický výpočtový simulační program pro jejich optimalizační návrh. Má potenciál se dále rozvíjet

Práci hodnotím jako úspěšnou, která splňuje kritéria na udělení titulu Ph.D. a doporučuji ji proto k obhajobě.

V případě uspokojivého zodpovězení dotazů k práci a vyjádření se k uvedeným diskusním otázkám doporučuji udělit akademický titul Ph.D.

V Praze dne 12. 6. 2018

.....

doc. Ing. Svatomír Slavík, CSc.