



## ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní  
ústav letecké dopravy

Doc. Ing. Daniel Hanus, CSc., EUR ING, AFAIAA

### **Oponentní posudek doktorské disertační práce Ing. Víta Štorcha**

**Název práce:** Verified Unsteady Model for Analysis of Contra-Rotating Propeller Aerodynamics

**Doktorský studijní program:** Strojní inženýrství

**Studijní obor:** Termomechanika a mechanika tekutin

**Školitel:** Prof. Ing. Jiří Nožička, CSc.

**Školitel specialista:** Ing. Jan Čížek, Ph.D.

**Oponent:** Doc. Ing. Daniel Hanus, CSc., EUR ING, AFAIAA

Posuzovaná doktorská disertační práce je v anglickém jazyce a obsahuje 143 stran důvodové zprávy a 11 stran příloh.

Cílem práce je vyvinout výpočetní model umožňující provedení detailního rozboru aerodynamických vlastností protiběžných vrtulí při nízkých Reynoldsových číslech, které dosud nejsou známy z literatury a vyjádřit výkonnostní charakteristiky s využitím vyvinutého výpočetního modelu. Zadané cíle předložené disertační práce jsou dále specifikovány do tří hlavních cílů, kterými jsou: 1. Tvorba modelu proudění s interakcí vazké a nevazké oblasti umožňující zachytit vliv úplavů za první řadou listů, 2. Tvorba „Force-free vortex wake“ modelu aplikovaného na protiběžnou vrtuli, 3. Popis vlastností protiběžné vrtule jako funkce návrhových parametrů. Dalším, v práci nazvaným sekundárním cílem, je ověření teoretického řešení průtoku vzduchu protiběžnou vrtulí jednoduššími výpočty a fyzikálním experimentem na speciálně navrženém zkušebním zařízení.

Vlastní práce je členěna do 10 kapitol, v kterých je podrobně uveden celý postup zpracování disertační práce, popis metody a způsobu řešení včetně kritického zhodnocení dosažených výsledků.

V úvodních třech kapitolách disertant uvádí rekapitulaci teoretického základu aerodynamiky vrtule a uvádí přehled používaných modelů a metod pro popis a stanovení výkonových parametrů vrtule jako funkce geometrie a otáček. V této části se zaměřuje dále na problematiku průtoku vzduchu systémem dvou protiběžných vrtulí.

Ve čtvrté kapitole formuluje na základě závěru z provedené literární rešerše hlavní cíl práce, kterým je vyvinutí nového výpočetního modelu pro stanovení výkonových parametrů dvojice protiběžných vrtulí při nízkých Reynoldsových číslech, které podle výsledků literárního průzkumu nejsou v současnosti zpracovány.



V dalších čtyřech kapitolách disertant uvádí implementaci dvou matematických modelů popisujících průtok tekutiny rotujícími vrtulovými listy. V první řadě to je popis proudového pole vírovou metodou „Free Vortex Wake Model“ a jeho aplikaci pro případ průtoku dvojicí protiběžných vrtulí. V práci se dále disertant zaměřuje na popis aerodynamických charakteristik vrtulových listů, tedy vztlaku a odporu jako funkce geometrického tvaru, a sice dvěma modely: Prandtlova modelu pro vztlak křídla a 3D panelovou metodu pro popis obtékání jednotlivých listů vrtule, pracující s dvourozměrnou mezní vrstvou. V závěru teoretického řešení se disertant zaměřuje na vliv mezních vrstev při obtékání vrtulových listů, které popisuje ve dvourozměrném modelu při obtékání aerodynamických profilů vrtulových listů. Proudové pole při obtékání vrtulových listů pak rozděluje do dvou oblastí, a sice oblast reprezentovanou mezními vrstvami a oblast proudění bez vlivu vazkosti, tedy oblast, která je popsána vztahy pro potenciální proudění.

V osmé kapitole disertant uvádí popis navrženého experimentálního zařízení a měřícího řetězce pro měření výkonových parametrů dvojice protiběžných modelových vrtulí. Navržené experimentální zařízení zajišťuje protiběžný pohon dvou identických modelových vrtulí o průměru téměř 560 mm a zjištění výkonových charakteristik protiběžných vrtulí. Naměřené výkonové charakteristiky jsou v práci popsány v klasických bezrozměrných součinitelích, tedy součinitelích tahu, výkonu a účinnosti jako funkce rychlostního součinitele. Součástí měření výkonových charakteristik byla i hluková měření hlukových spekter generovaných dvojicí protiběžných vrtulí.

V deváté kapitole disertant uvádí srovnání výsledků fyzikálního experimentu s výsledky numerického výpočtu pro oba dva navržené matematické modely, tedy porovnání průběhů aerodynamických a výkonových charakteristik pro zkoumanou dvojici modelových protiběžných vrtulí. Srovnáním výsledků numerických modelů s experimentem ukazují velmi dobrou shodu v celém průběhu výkonových charakteristik a také velmi dobrou shodu pokud jde o generovaný hluk.

Závěrečná desátá kapitola obsahuje posouzení přínosu výsledku doktorské disertační práce pro doplnění současného stavu poznání a teoretického popisu proudění vzduchu dvojicí protiběžných vrtulí a také pro lepší porozumění procesů při průtoku dvojicí protiběžných vrtulí.

V závěru doporučuje disertant pokračovat ve výzkumu zaměřeného na aplikace do oblasti větrných turbín se svislou osou a do oblasti pohonu bezpilotních prostředků.

### **Celkové hodnocení práce**

Doktorská disertační práce se zaměřuje na poznání fyzikálních jevů v prostorovém proudění vzduchu při průtoku dvojicí protiběžných vrtulí a vyvinutí nových výpočetních modelů popisujících průtok při malých Reynoldsových číslech a umožňujících stanovit výpočtem výkonové parametry jako funkce geometrie a otáček.

Cíl práce je z tohoto zřetele velmi významný a je příspěvkem k rozvoji poznání v této oblasti.



Na základě celkového kritického posouzení práce konstatuji:

1. Disertant beze zbytku dosáhl ve své práci stanoveného cíle, navrhl a validoval dva fyzikálně-matematické modely popisující průtok vzduchu dvojicí protiběžných vrtulí při malých Reynoldsových číslech proudění.
2. Úvodní část disertační práce přesvědčivě a důkladně informuje o provedeném literárním průzkumu v oblasti řešené problematiky, jak je uvedeno v textu i pokud jde o literární podklady
3. Práce navrhuje doplnění stávajících teoretických přístupů a metod výpočtu v uvedené problematice, vysvětluje důvody, konkrétně popisuje nové dva výpočetní modely a výsledky provedených výpočtů a jejich validace srovnáním s výsledky experimentu.
4. Možnost stanovit výpočtem výkonové parametry a charakteristiky dvojice protiběžných vrtulí, byť i pouze v oblasti nízkých Reynoldsových čísel je bezesporu praktickým přínosem.
5. Použité metody řešení shledávám jako vhodné a přiměřené.
6. Aplikace použitých metod v práci vede ke konkrétním výsledkům a k možnostem jejich praktického využití.
7. Posuzovaná doktorská disertační práce svým obsahem i rozsahem představuje vědeckou práci vysoké kvality. Disertant při řešení úkolu prokázal velmi dobrou orientaci a znalosti v oblasti aerodynamiky včetně vnější letecké aerodynamiky a vysokou úroveň teoretických znalostí a schopností vědecké práce i praktických dovedností při návrhu a provádění experimentálního ověřování a validace teoretických předpokladů.
8. Práce je po formální stránce zpracována velice přehledně, logicky i přehledně členěna s vysokou úrovní grafického zpracování. Obsahuje všechny požadované prvky pro vědecké publikace. Svým rozsahem převyšuje běžné doktorské disertační práce z daného vědního oboru. Je psána v anglickém jazyce a srozumitelně popisuje celý postup řešení.

Celkově hodnotím posuzovanou doktorskou disertační práci pana Ing. Víta Štorcha jako výborný přínos k poznání v dané oblasti vědeckého výzkumu a také jako reálný praktický přínos pro inženýrský návrh s možnými aplikacemi v oblasti malých propulsních vrtulových jednotek.



**Na základě celkového posouzení doktorské disertační práce ji doporučuji k obhajobě**

a v případě úspěšného obhájení pak panu Ing. Vítu Štorchovi udělit vědecký titul Philosophiæ Doctor, Ph.D.

V Praze, 2. 2. 2018

Doc. Ing. Daniel Hanus, CSc., EUR ING, AFAIAA

**Otázky pro obhajobu:**

1. Je možné aplikovat navržené výpočetní modely také na kontra-rotující propfany pro dopravní letadla?
2. Je možné využít navržené numerické metody pro optimalizaci konstrukčního návrhu dvojice protiběžných vrtulí z hlediska snížení hladiny generovaného hluku a jak?
3. Mohou vyvinuté modely přispět ke zvýšení celkové účinnosti pohonu nové generace dopravních letadel s kontrarotativními ventilátorovými pohony a přispět tak ke splnění hlavního cíle Evropské unie pro letectví do roku 2050?
4. Jaké úpravy současně navržených výpočetních modelů bude nutné provést, pokud bude možné jejich extrapolace do oblasti vysokých Reynoldsových a Machových čísel proudění?
5. Jaká je představa o využití protiběžných vrtulí pro UAV a v čem spatřuje jejich přednost proti klasické vrtuli?
6. Je maximální celková účinnost dvojice protiběžných vrtulí vyšší než v případě jednoduché vrtule při stejných hodnotách tahového a rychlostního součinitele? Pokud ano, bude použití dvojice protiběžných vrtulí výhodnější než pohon jednou vrtulí i při konstrukční složitosti vrtulového náhonu?