

---

Ing. Erik Flídr,  
Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.  
Laboratoř aerodynamiky vysokých rychlostí  
V Mezihorí 2a, 180 00, Praha



---

Oponentní posudek diplomové práce pana Bc. Františka Měkuty  
**Experimentální výzkum turbulence za malou leteckou vrtulí**

Předložená diplomová práce je členěna do sedmi logicky navazujících kapitol včetně závěru.

První kapitola nastiňuje motivaci práce společně s definováním cílů. Prvním cílem práce je sestavit aparaturu, která bude využita k výzkumu turbulence za malými leteckými vrtulemi. Dalším cílem je tuto aparaturu využít právě k výzkumu turbulence za malými leteckými vrtulemi.

Druhá kapitola se věnuje popisu leteckých vrtulí. Je zde stručně popsán profil vrtule s příslušnými geometrickými charakteristikami. Dále jsou v dostatečné míře diskutovány síly a aerodynamické parametry, které jsou nutné pro popis vrtulí. Rovněž jsou uvedeny některé základní návrhové metody vrtulí a také nežádoucí aerodynamické jevy, které se v tomto oboru vyskytují.

Třetí kapitola se věnuje problematice turbulence proudění. Jsou uvedeny vlastnosti, které turbulentní proudění charakterizují. Náhodná povaha turbulence a deterministický chaos je zde demonstrován na Lorenzově systému. Zde by vzhledem k prostoru, který byl této problematice věnován, bylo možná vhodné Lorenzovu práci "*Edward N. Lorenz: Deterministic Nonperiodic Flow, Journal of the Atmospheric Science, Vol. 20, pp. 130–141, (1963)*" citovat. Dále jsou zavedeny pojmy středování, distribuční funkce, hustota pravděpodobnosti, momenty a intenzita turbulence. Rovněž jsou diskutována měřítka turbulentního proudění a energetické spektrum, reprezentující transport energie mezi jednotlivými délkovými měřítky.

Čtvrtá kapitola se věnuje popisu měřicí techniky žhavených elementů. Stručně je popsán princip měření a režimy, ve kterých je možné sondy se žhavenými elementy provozovat. Dále jsou uvedeny typy sond (HWA a HFA). Podrobněji je diskutována metoda CTA, která je pak v experimentální části použita. Prostor je rovněž věnován shrnutí vlivu směru proudění na měření rychlosti sondami HWA.

Pátá kapitola se zaměřuje na popis experimentálního zařízení a jeho základní charakteristiky. Rovněž jsou uvedeny parametry prováděných experimentů a metodika vyhodnocení dat a testovací měření, která posloužila jako výchozí bod pro výzkum samotných vrtulí.

Kapitola šest se věnuje rozboru dosažených výsledků. Zde jsou diskutovány celkem tři testované případy vrtulí, přičemž důraz je kladen na vyhodnocení intenzity turbulence v měřených rovinách za vrtulemi a na rozbor spektrálních výkonových hustot ve vybraných měřených bodech.

Poslední kapitolou (sedmou) je závěr, kde je shrnut seznam cílů práce a jejich splnění, stručná rekapitulace výsledků a nastínění možného dalšího využití dat získaných v rámci DP (možná validace numerických simulací).

### Hodnocení práce:

Předložená diplomová práce *Experimentální výzkum turbulence za malou leteckou vrtulí* je na dobré odborné úrovni. Autor zpracoval náročné téma nestacionárního měření rychlosti za malými leteckými vrtulemi, které je v současné době, vzhledem k rostoucím nárokům především v oblasti snižování hluku, velmi aktuální. Před samotnými experimenty autor správně provádí rešerši problematiky vrtulí a měřicí techniky využití v rámci jeho DP. Je proveden popis experimentálního zařízení a ověřovacích měření před samotnými experimenty, což je správný postup. Jako měřicí technika je volena metoda žhaveného drátku v režimu CTA, která má vzhledem ke studovanému jevu dostatečnou časovou odezvu a také dobré prostorové rozlišení. Anemometr byl před měřením kalibrován v dostatečném rozsahu rychlostí. Náročná úloha synchronizace měření rychlosti anemometrem s otáčkami vrtule byla realizována pomocí optického snímače otáček. Díky tomu mohl autor provést průměrování na otáčku, a tak bylo možné vyhodnotit intenzitu turbulence za studovanými vrtulemi. V důsledku kolísání otáček je toto průměrování prováděno pro otáčky, které obsahovaly stejný počet vzorků, aby výsledná data nebyla ovlivněna kolísáním otáček. Vyhodnocení spekter pak ukázalo periodické chování vrtulí a další frekvenci okolo 10 Hz, kterou autor spojuje s chováním tunelu. Naměřené signály byly zpracovány v prostředí MATLAB, zde není z DP úplně jasné, zda je autor práce rovněž autorem kódů, které byly pro vyhodnocení dat použity, nebo zda použil software vytvořený někým jiným. Bez ohledu na poslední poznámku je postup vyhodnocení správný. Rovněž oceňuji grafickou podobu DP, která je taktéž na vysoké úrovni. Po jazykové stránce je práce psána srozumitelně a gramaticky správně s občasnými překlepy, pár příkladů:

- str. 19, 3 odstavce: ... pro **kvanifikaci** turbulence ...
- str 31, první věta odst. 2.4.3: Hluk vrtule lze rozdělit **podle** ...
- str 45, poslední odstavce: ...sond podle **shopnosti**...

a pár dalších.

Na straně 25 pak v odstavci 2.3.2 druhá věta **V teorii ideálního propulsoru ...**, by pravděpodobně mělo být **V teorii ideální vrtule**.

V rovnici (2.21) by pak pravděpodobně nemělo být  $\Delta v^2$  ale pouze  $\Delta v$ .

Dále mám k předložené diplomové práci následující poznámky:

- V práci chybí stanovení nejistot měření. Autor hojně cituje zdroj [15] *JØRGENSEN, Finn E. How to measure turbulence with hot-wire anemomenters. Denmark: Dantec Dynamics, 2005*, který je výborným materiálem pro studium měření sondami se žhavenými drátky. Tento manuál rovněž podrobně popisuje stanovení nejistot měření, od chyby způsobené samotnou kalibrací sond, přes chybu způsobenou A/D převodníkem až po samotné měření. Tato část mi však v DP chybí.
- V návaznosti na předchozí komentář bych také v budoucnu věnoval větší pozornost popisu použité aparatury. Není zde například uveden použitý A/D převodník, měřicí karta, tlakové snímače použité při měření Prandtlovou sondou. Tyto údaje jsou nepostradatelné pro stanovení nejistot měření.
- Při popisu spekter autor spekuluje o původu frekvence 10 Hz. Tyto nízké frekvence bývají způsobeny samotnými tunely, avšak nedomnívám se, že by se jednalo o frekvenci způsobenou sítí, jak je v práci zmíněno. Síť naopak mají za cíl jakékoliv takovéto významné periodické jevy potlačit, tím že se za nimi vytvoří homogenní izotropní turbulence. Pro potvrzení nebo vyvrácení tohoto zdroje bych proto doporučil v budoucnu provést měření s tunelem se sítí a bez sítí.

Celkově hodnotím předloženou diplomovou práci Bc. Františka Měkuty jako precizně zpracovaný experimentální výzkum, který může mít praktický význam a lze na něj dále navázat. Výsledky lze jednak použít pro validaci numerických výpočtů a dále lze určitě navázat dalšími měřeními, které přinesou nové poznatky v oblasti malých leteckých vrtulí.

Předloženou diplomovou práci Experimentální výzkum turbulence za malou leteckou vrtulí hodnotím kvalifikačním stupněm **A - výborně**

**Otázky k obhajobě:**

K samotné obhajobě DP mám dvě následující otázky:

1. Mohl by autor prosím diskutovat stanovení nejistot měření při měření anemometry se žhaveným drátkem a demonstrovat jejich výpočet na některém z měřených bodů? Ideálně vytipovat případ, kde bude nejistota měření nejvyšší, pravděpodobně se bude jednat o místa s nejmenší měřenou rychlostí.
2. Jako laika v oblasti vrtulí mě zaujalo uspořádání měření, kdy je zvolena jednodrátková sonda umístěná rovnoběžně s osou rotace motoru. Jak autor sám diskutuje v odstavci 4.2.3 sondy jsou citlivé na směr proudění. Toto uspořádání experimentu tedy mlčky předpokládá osový směr proudění za vrtulí. Pokud by tomu tak nebylo, tak by měřená data byla v důsledku směrové citlivosti sondy podhodnocena. Byla platnost tohoto předpokladu nějak ověřena? Pokud ano, tak jak? A pokud ne, mohl byste prosím odhadnout, jak moc mohou být Vámi měřená data tímto jevem ovlivněna?

V Praze  
29. května 2024

Ing. Erik Flídr