



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

**OPTIMALIZACE VRTULÍ PRO BEZPILOTNÍ PROSTŘEDKY
S UVÁŽENÍM HLUČNOSTI**

NOISE REDUCTION ORIENTED OPTIMIZATION OF UAV PROPELLERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matěj Ecler

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Robert Popela, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Bc. Matěj Ecler**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Stavba letadel
Vedoucí práce: **Ing. Robert Popela, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Optimalizace vrtulí pro bezpilotní prostředky s uvážením hlučnosti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

S rostoucím využitím bezpilotních prostředků menších rozměrů, zejména typu multicopter roste poptávka po adekvátních a vysoce efektivních propulzorech v různých uspořádáních. Vystává tedy potřeba optimalizace vrtulí pro drony. Jedním z nových a stále zásadnějších požadavků je minimalizace hlučnosti vrtulí, jelikož jsou hlavním zdrojem hluku při provozu dronu.

Cíle diplomové práce:

Provedení analýzy účinnosti současného typu vrtule pro dron typu multicopter. Volba zásadních režimů pro optimalizaci vrtule. Výběr vhodné metody pro určení charakteristik vrtule a rovněž její akustické vlastnosti – výpočetní nebo experimentální. Provedení optimalizace a návrh změn vrtule.

Seznam doporučené literatury:

KEANE, A., J., NAIR, P., B., Computational Approaches for Aerospace Design, John Wiley and Sons, 2005.

YANG, L., HUANG, J., Yi, M., ZHANG, Ch., XIAO, Q., A numerical study of the effects of design parameters on the acoustics noise of a high efficiency propeller, Acoustical Physics, November 2017, Volume 63, Issue 6, pp 699–710.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací vrtulí s cílem snížení jejich hlučnosti. Na základě měření hluku sériových vrtulí byly zhodnoceny hlavní zdroje hluku vrtulí. Následnými 2D simulacemi proudění na jednotlivých profilech po rozpětí listů vrtulí byla zjištěna místa výskytu separačních bublin, které byly identifikovány jako potenciální zdroj hluku. Na základě těchto zjištění byly vrtule opatřeny turbulátorovými páskami o různých rozměrech a byl experimentálně ověřen jejich vliv na hlučnost a účinnost vrtulí. Výsledky měření neprokázaly přínos použitých turbulátorových pásek ke snížení hlučnosti ani ke zvýšení účinnosti.

Summary

This diploma thesis deals with optimization of propellers with the aim to reduce their noise level. Based on the measurement of noise level of serial propellers, major propeller noise sources were evaluated. Subsequent 2D simulations of the flow on the individual profiles along the propeller span revealed the locations of separation bubbles, which were identified as a potential source of the noise. Based on these findings, propellers were equipped with turbulator trips of various dimensions and their effect on the noise level and efficiency of the propellers was experimentally verified. The results did not show contribution of turbulator trips to noise reduction or efficiency.

Klíčová slova

vrtule, akustika, intenzita hluku, turbulátor

Keywords

propeller, acoustics, noise level, turbulator

ECLER, M. *Optimalizace vrtulí pro bezpilotní prostředky s uvážením hlučnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2020. 73 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Robert Popela, Ph.D..

Tímto prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vykonal samostatně, na základě uvedených literárních pramenů a pod vedením vedoucího diplomové práce.

Bc. Matěj Ecler

Děkuji mému vedoucímu diplomové práce Ing. Robertu Popelovi, Ph.D. za vedení a pomoc při vypracování této práce. Dále děkuji panu Ing. Aleši Prokopovi, Ph.D. za pomoc při měření v anechoické komoře na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství a za vyhodnocení měření. Díky patří také firmě Mejlík Propellers s. r. o. za zapůjčení vrtulí a standu pro měření.

Bc. Matěj Ecler

Obsah

Úvod	3
1 Teoretická část	4
1.1 Charakteristika vrtulí	4
1.1.1 Zatížení disku a výkonové zatížení	4
1.2 Teorie návrhu vrtulí	6
1.2.1 Hybnostní teorie	6
1.2.2 Teorie elementu listu	7
1.2.3 Teorie nosné čáry	8
1.2.4 Teorie nosné plochy	8
1.2.5 Panelové metody	8
1.2.6 Počítačová dynamika tekutin (CFD)	9
1.3 Zvuk, hluk a životní prostředí	10
1.3.1 Základní pojmy	10
1.3.2 Veličiny charakterizující zvuk	10
1.3.3 Typy spekter	16
1.4 Základní typy zdrojů zvuku	17
1.4.1 Monopól	17
1.4.2 Dipól	18
1.4.3 Kvadrupól	18
1.5 Zdroje aerodynamického hluku	19
1.5.1 Hluk od rotace	19
1.5.2 Interakční zdroje hluku	20
1.5.3 Hluk vyvolaný víry	20
1.5.4 Hluk indukovaný turbulencemi	21
1.6 Výpočet hluku vrtule	21
1.7 Režimy obtékání profilu	22
1.7.1 Reynoldsovo číslo	22
1.7.2 Obtékání profilu	23
1.7.3 Laminární separační bubliny	26
1.8 Možnosti úpravy nosných ploch	28
1.8.1 Vortex generator	29
1.8.2 Turbulátor	30
1.9 Dosavadní poznatky o snižování hluku vrtulí	33
1.9.1 Mezioborový přístup k návrhu tiché vrtule	33
1.9.2 Návrh vrtule pro konkrétní provozní stav	33
1.9.3 Započítání celé pohonné jednotky	33
1.9.4 Redukce širokopásmového hluku pomocí turbulátorové pásky	33
1.10 Stanovení rozsahu řešení	35

2 Praktická část	36
2.1 Popis měření akustických a výkonových veličin	36
2.1.1 Zaznamenávané veličiny - akustické	37
2.1.2 Zaznamenávané veličiny - výkonové	37
2.1.3 Detailní postup měření	37
2.2 Vizualizace proudění vzduchu v anechoické komoře	38
2.3 Ověření vzniku a polohy separačních bublin	40
2.3.1 Výpočet rozložení tlaku	40
2.3.2 Určení optimální polohy turbulátorové pásy	44
3 Výsledky a diskuze	48
3.1 Srovnání hluku v neodhlučném a odhlučném prostoru	48
3.2 Srovnání hluku v kolmém a diagonálním směru	48
3.3 Frekvenční charakteristika	49
3.4 Měření vrtulí s turbulátory	51
3.4.1 Hluk vrtulí s úpravami nosné plochy	52
3.4.2 Ověření opakovatelnosti měření	54
3.4.3 Frekvenční spektrum vrtulí s úpravami nosné plochy	55
3.4.4 Účinnost vrtulí s úpravami nosné plochy	59
Závěr	62
Literatura	64
Seznam použitých zkratk a symbolů	68
Seznam obrázků	71

Úvod

Rostoucí popularita UAV letounů (Unmanned Aerial Vehicle) neboli dronů v posledních letech zapříčinila významný růst celého trhu s bezpilotními letouny. Snižování ceny bezpilotních letounů a dostupnější technologie mají za následek rozšiřování jejich uplatnění. Dnes drony slouží k rozličným účelům. Od čistě amatérských aktivit po ty vysoce specializované, například doprava materiálu, lékařské a záchranářské účely, vojenské účely, monitorování špatně dostupných oblastí, ošetřování zemědělské půdy a spousta dalších. Z tohoto důvodu stále více firem navázaných na tuto oblast trhu investuje prostředky do vylepšení bezpilotních prostředků a rozšíření jejich aplikace.

Rostou také výdaje na vývoj bezpilotního dronu pro přepravu osob. Tento revoluční způsob přepravy by výrazně zkrátil dobu cestování na krátké vzdálenosti, v obydlených oblastech by snížil provoz a díky elektrickému pohonu, který je u bezpilotních prostředků dominantní, by také snížil zátěž životního prostředí.

Nejrozšířenějším pohonným ústrojím bezpilotních letounů je vrtule poháněná elektromotorem, který je napájen z akumulátoru. Rotující vrtule vytváří tah, který drží dron ve vzduchu a umožňuje jeho manévrování. Tento typ pohonu je ekologický, snadný na údržbu a elektrická energie je dostupnější oproti fosilním palivům. Nevýhodou elektrického pohonu je nízká hustota energie akumulátorů. Díky tomuto aspektu je kladen velký důraz na nízkou hmotnost dronů a na vysokou účinnost pohonného ústrojí.

Další velkou nevýhodou vrtulového pohonu je vysoká hlučnost, kterou vrtule generující tah vytváří. Vysoká hlučnost má na životní prostředí negativní vliv a je jednou z překážek bránících nasazení dronů v obydlených oblastech například pro přepravu materiálu místo rozvázkových služeb.

Při návrhu vrtule je třeba vzít v úvahu celou řadu parametrů, které mají v některých případech protichůdný vliv na výsledné vlastnosti vrtule. Některé metody snížení hlučnosti vrtule mohou mít negativní vliv na jiné parametry, například snížení účinnosti vrtule, které má negativní vliv na dolet letounu. Při snižování hlučnosti je proto potřeba najít takové řešení, které negativně neovlivní zbylé vlastnosti vrtule.

Tato diplomová práce vznikla ve spolupráci s firmou Mejzlík Propellers s.r.o. zabývající se výrobou kompozitních vrtulí pro široké spektrum aplikací. Optimalizace vrtulí s ohledem na snížení hlučnosti je stále častějším požadavkem zákazníků. Firma proto podniká kroky ke snížení hlučnosti svých vrtulí, díky kterým by mohla rozšířit jejich uplatnění.

1. Teoretická část

1.1. Charakteristika vrtulí

Vrtule je zařízení přeměňující energii rotačního pohybu na tah. Rotační pohyb vrtule zabezpečuje motor, na kterém je vrtule upevněna. Tah a další charakteristiky vrtule nejsou konstantní, nýbrž závisí na rychlosti nabíhajícího proudu a na otáčkách vrtule. Aby bylo možné porovnat vrtule různých rozměrů a počtů listů, byly zavedeny bezrozměrné koeficienty popisující základní charakteristiky vrtule: [1]

- koeficient tahu: $c_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$
- koeficient kroutícího momentu: $c_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$
- koeficient výkonu: $c_P = \frac{P}{\rho n^3 D^5}$
- postupový koeficient: $J = \frac{V_a}{nD}$

kde T je tah vrtule, Q kroutící moment vrtule, P výkon vrtule, ρ hustota vzduchu, n otáčky vrtule za sekundu, D průměr vrtule a V_a rychlost nabíhajícího proudu. [1] [2]

Dalším důležitým parametrem je účinnost vrtule. Tu lze určit z poměru příkonu a výstupního výkonu P_{in} a P_{out} následujícím způsobem: [2]

$$P_{in} = 2\pi nQ \quad (1.1)$$

$$P_{out} = TV_a \quad (1.2)$$

Účinnost vrtule je dána rovnicí:

$$\eta = \frac{TV_a}{2\pi nQ} = \frac{k_T \rho n^2 D^4 V_a}{k_Q \rho n^2 D^5 2\pi n} = J \frac{k_T}{2\pi k_Q} \quad (1.3)$$

Dalším udávaným geometrickým parametrem vrtulí je hustota lopatkové mříže. Ta je dána poměrem plochy listů a celkovou průtočnou plochou, která je dána plochou kruhu vymezeného průměrem vrtule. Hustota lopatkové mříže je dána následujícím vztahem: [3]

$$\sigma = \frac{N_b c}{\pi R} \quad (1.4)$$

kde N_b je počet listů vrtule, c ekvivalentní délka tětivy profilu a R poloměr vrtule.

1.1.1. Zatížení disku a výkonové zatížení

Často používaným parametrem popisujícím vrtule je parametr zatížení disku T/S v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, kde S je celková průtočná plocha vrtule v m^2 , označovaný jako DL (Disc Loading). Při visu má tah generovaný vrtulí stejnou velikost jako hmotnost letounu. Proto lze snadno definovat poměr generovaného tahu a obsahu kruhové plochy vymezené průměrem vrtule. [4]

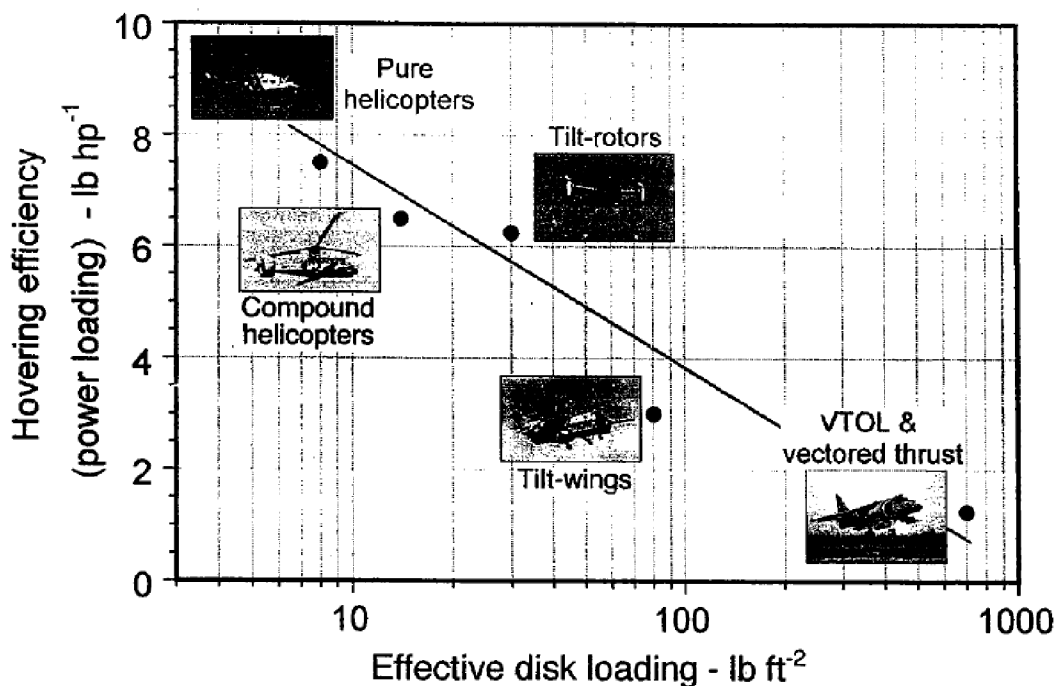
Obdobně lze definovat výkonové zatížení T/P označované jako PL (Power Loading) v $\text{kg} \cdot \text{kW}^{-1}$, kde P je výkon vrtule v kW. Hodnota ideálního výkonu vrtule potřebného

1.1. CHARAKTERISTIKA VRTULÍ

pro vis je rovna $P = TV_A$, kde V_A je rychlost vstupujícího proudu vzduchu do vrtule. Ze vzorce je patrné, že ideální výkonové zatížení je nepřímo úměrné rychlosti vstupujícího proudu vzduchu.

$$V_A = \sqrt{\frac{T}{2\rho S}} = \sqrt{\frac{DL}{2\rho}} = \frac{P}{L} = \frac{1}{PL} \quad (1.5)$$

Výkonové zatížení klesá se zvyšujícím se zatížením disku, jak vidět na obrázku 1.1. Helikoptéry operují v zatížení disku v rozsahu od 24 do 48 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$. Jejich vrtule poskytují relativně velký tah vzhledem k výkonovému zatížení do 5 $\text{kg}\cdot\text{kW}^{-1}$. Helikoptéra je proto v porovnání s ostatními VTOL letouny ve visu efektivnější.



Obrázek 1.1: Znázornění účinnosti ve visu pro různé druhy VTOL letounů v závislosti na zatížení disku v logaritmickém měřítku. [4]

1.2. Teorie návrhu vrtulí

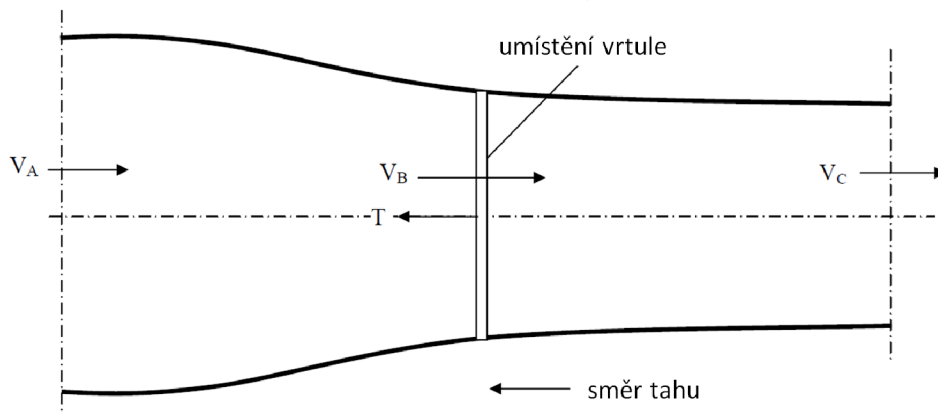
Metody návrhu vrtulí se postupem času vyvíjely od základní hybnostní teorie až po panelové metody a počítačovou dynamiku tekutin. Následující podkapitoly popisují jednotlivé teorie, jejich vhodnou aplikaci a případná úskalí.

1.2.1. Hybnostní teorie

Hybnostní teorie využívá objemového toku, hybnosti a zákona zachování energie. Tato teorie předpokládá následující:

- prostředí je považováno za nevazké (ideální kapalina), nedochází proto ke ztrátám energie
- rotor je disk s nekonečným počtem listů, které mají nekonečnou štíhlost
- rotor v úplavu nezpůsobuje rotaci prostředí

Ze základní rovnice tahu je známo, že velikost tahu vrtule je závislá na hmotnostním průtoku vrtulovým diskem a změně rychlosti proudu vzduchu skrz propulzní systém (v tomto případě skrz vrtuli), viz obrázek 1.2. [3]



Obrázek 1.2: Znázornění hybnostní teorie. [5]

Tah je roven součinu hmotnostního toku a změně rychlosti proudění vzduchu: [5]

$$T = \dot{m}(V_C - V_A) \quad (1.6)$$

kde \dot{m} je hmotnostní tok skrz rotující disk. Energie absorbovaná vrtulí je rovna: [5]

$$E_A = \frac{1}{2} \dot{m}(V_C^2 - V_A^2) \quad (1.7)$$

Energie dodaná vrtulí se rovná práci, kterou vykoná tah: [5]

$$E_D = TV_B \quad (1.8)$$

Dalšími úpravami detailně rozpracovanými v [5] dostaneme finální vztah pro maximální účinnost vrtule:

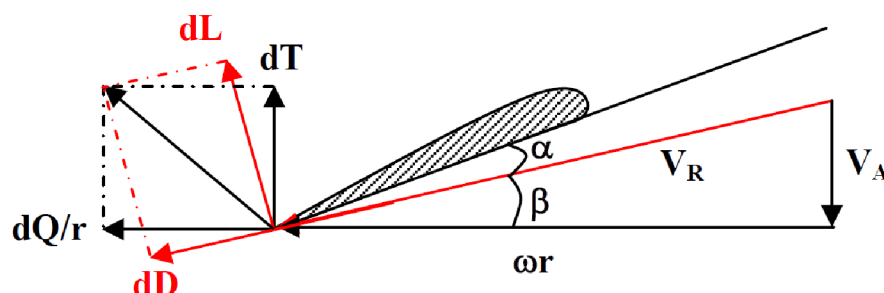
$$\eta_0 = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + c_T}} \quad (1.9)$$

η_0 reprezentuje maximální teoretickou účinnost vrtule, které lze dosáhnout v nevazkém prostředí s vrtulí, která nezpůsobuje rotaci v úplavu. Je proto nazývána *ideální účinnost*.

Hybnostní teorie neposkytuje žádné informace o návrhu listů rotoru, aby generoval daný tah. Ztráty účinnosti díky odporu od profilu jsou také zanedbány.

1.2.2. Teorie elementu listu

Tato teorie je založená na předpokladu, že každý element rotoru může být považován za profil. Na každý profil je aplikována silová rovnováha mezi složkami vztlaku, odporu, tahu a kroutícího momentu. Výsledné hodnoty jednotlivých částí listu jsou poté sečteny a z výsledků je určen celkový výkon a kroutící moment rotoru. [5]



Obrázek 1.3: Silová rovnováha vybrané části listu vrtule. dT je tah, dQ kroutící moment, dL vztlak, dD odpor, V_A rychlost nabíhajícího proudu, ωr obvodová rychlost, V_R výsledná rychlost, α úhel náběhu a β úhel zkroucení listu. [5]

Rychlost nabíhajícího proudu je definována následujícím vztahem: [5]

$$V_R = \sqrt{V_A^2 + (\omega r)^2} \quad (1.10)$$

Celkový tah jednoho listu lze získat integrací dT po celém poloměru listu. Obdobně lze získat celkový kroutící moment jednoho listu.

Účinnost vrtule lze určit podle následujícího vztahu: [5]

$$\eta = \frac{TV_A}{Q\omega} \quad (1.11)$$

Tuto teorii lze při návrhu vrtule použít v kombinaci s hybnostní teorií. Kombinace těchto teorií nese název „Blade Element Momentum Theory“ (BEMT). Nejprve se postupuje podle teorie elementu listu po celém rozpětí listu a pro určení rychlostí proudění se použije hybnostní teorie. [3]

Teorie elementu listu se stále dopouští nepřesnosti, protože neuvažuje ovlivnění daného profilu profily sousedními.

1.2.3. Teorie nosné čáry

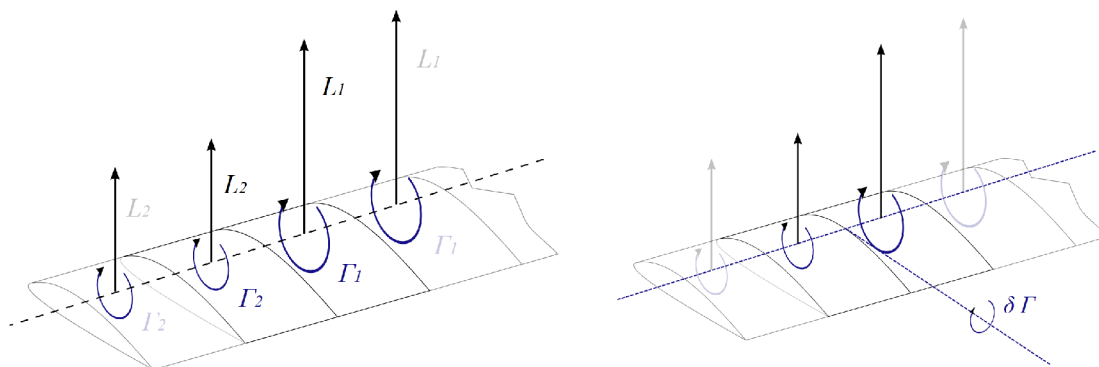
Jedná se o teorii, kterou lze aplikovat na třírozměrná přímá křídla a listy vrtulí bez šípovitosti. Křídlo nebo list vrtule je nahrazen čarou o stejné délce umístěné v 1/4 délky tětiny. Tato teorie vychází z Prandtlova modelu vztlakové čáry [6]. Prandtl aplikoval koncept cirkulace a Kutta-Joukowski teorém na výpočet vztlaku dL jednotlivého elementu: [7]

$$dL = \rho V_A \Gamma \quad (1.12)$$

kde Γ je cirkulace definována integrálem po uzavřené křivce:

$$\Gamma = \oint_V V ds = \oint_V V \cos\Theta ds \quad (1.13)$$

kde uzavřená křivka C symbolizuje tvar profilu a integrand $V \cos\theta$ značí lokální rychlost proudění v tečném směru ke křivce C .



Obrázek 1.4: Znázornění cirkulace podle Kutta-Joukowski teorému. $\delta\Gamma$ ukazuje směr partiální cirkulace mezi dvěma průřezy křídla s rozdílnými cirkulacemi Γ_1 a Γ_2 . [8]

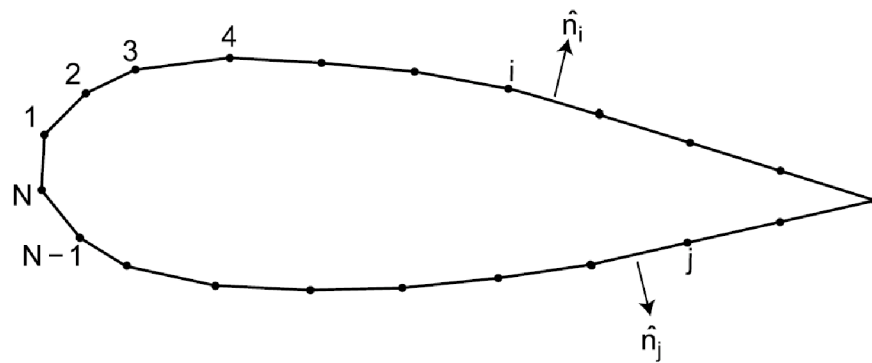
1.2.4. Teorie nosné plochy

Tato teorie je vhodná pro použití u vrtulí, jejichž štíhlost listů (poměr mezi rozpětím a plochou listu; $A_R = \frac{D^2}{S}$) je nižší, například u lodních šroubů. Tato teorie pracuje s reálnou geometrií vrtule. Plocha vrtule je definována tloušťkou v každém místě profilu po rozpětí listu. [5]

1.2.5. Panelové metody

Při této metodě návrhu je plocha listu vrtule diskretizována, tzn. rozdělena na malé panely (ve 2D se jedná o úsečky, ve 3D o čtyřúhelníkové panely), viz obrázek 1.5. Dále je nutné zavést Kuttovu podmínku vynucující přítomnost stagnačního bodu na odtokové hraně. Tato podmínka zamezuje proudění v přetečení mezi horní a spodní stranou profilu a naopak. Další podmínkou ve výpočtu je nulová normálová rychlost proudění a to z toho důvodu, aby proudnice kopírovaly tvar obtékaného tělesa. [9]

Výsledkem je proudové pole kolem tělesa, ze kterého lze získat parametry nutné k vyhodnocení charakteristik vrtule, například rozložení tlaku na profilu. [5] [9]



Obrázek 1.5: Ukázka diskretizace povrchu 2D profilu. [9]

1.2.6. Počítačová dynamika tekutin (CFD)

Počítačová dynamika tekutin (z anglického Computational Fluid Dynamics) je obor mechaniky proudění, který využívá numerickou analýzu k řešení problémů trojrozměrného proudění kapalin. K výpočtům simulujícím nerozrušené proudění a jeho interakci s povrchy definovanými pomocí okrajových podmínek jsou využívány tzv. superpočítače, tedy počítače s výrazně větší výpočetní kapacitou oproti běžným uživatelským počítačům. [10]

Základem všech CFD simulací jsou Navier-Stokesovy rovnice, které definují vlastnosti proudění kapaliny. Navier-Stokesovy rovnice se skládají z následujících silových složek:

$$F_s = F_m + F_p + F_t \quad (1.14)$$

kde F_s jsou setrvačné síly, F_m hmotnostní (objemové síly), F_p tlakové síly a F_t třecí síly. [10]

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + v_j \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_j}}_{\text{Setrvačné síly}} = \underbrace{-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\eta \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_j}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \right]}_{\text{Plošné síly}} + \underbrace{\rho a_i + F_i}_{\text{Hmotnostní (objemové) síly}}$$

tlakové síly
(normálové napětí)

třecí (viskózní) síly
(tečné napětí)

např.
gravitační síla

ostatní síly
- odstředivá
- elektromagnetická
- ...

Obrázek 1.6: Navier-Stokesovy rovnice pro jednofázové trojrozměrné neustálené proudění při konstantní hustotě a viskozitě. Nutné vyřešit ve všech třech směrech. [10]

Pro správnou funkci výpočetního modelu je nutné správně nastavit i další parametry výpočtu, například diskretizační přístupy, interpolační schémata a modely turbulentního proudění.

CFD lze s výhodou použít v případech, kdy je experiment příliš nákladný. Vzhledem k náročnosti problematiky je ovšem důležité znát pozadí všech výpočtů použitých v simulaci. Špatně nastavený výpočetní model může mít za následek velkou nepřesnost. [10]

1.3. Zvuk, hluk a životní prostředí

Zvuk je představován mechanickým kmitáním charakterizovaným parametry pohybu částice pružného prostředí. Obor fyziky, který se studiem zvuku zabývá, se nazývá akustika. Slyšitelný zvuk představuje akustické kmity schopné vyvolat sluchové vnímání. Lidské ucho vnímá kmity o kmitočtovém neboli frekvenčním složením v intervalu od 20 do 20 000 Hz. [11]

Hluk lze charakterizovat jako nežádoucí, rušivý, nepříjemný nebo škodlivý zvuk. [12] Na základě dosavadních studií lze negativní účinek hluku na lidský organismus rozdělit na *specifický* a *nespecifický*.

Specifickým účinkem hluku rozumíme především poškození smyslových buněk ve vnitřním uchu, jejichž funkcí je vnímat zvukové podněty a přenášet je do příslušných center mozku. Poškození těchto buněk nadměrným hlukem se projevuje ztrátou sluchové ostrosti, při delší časové expozici se může vyvinout sluchová ztráta různé závažnosti.

Nespecifický účinek hluku je dán oddělením zvukových podnětů při jejich vedení sluchovou drahou a jejich proniknutí jinými nervovými drahami do různých center v kůře mozkové. Dlouhodobá expozice nadměrnému hluku způsobuje poruchu neurovegetativní rovnováhy. Postižení dlouhodobou expozicí si většinou stěžují na: únavu, vyčerpanost, snížení koncentrace a pozornosti, zhoršení paměti atd. Zvláště negativní je vliv hlukové zátěže na spánek člověka. [11]

1.3.1. Základní pojmy

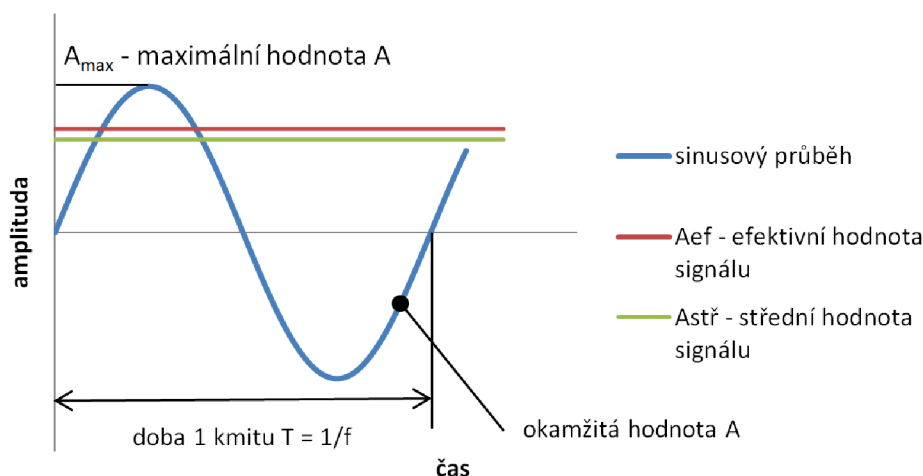
Proces posuzování problematiky hluku lze rozdělit do tří základních oblastí: [11]

- *zdroj hluku* jako takový. Princip jeho funkce, intenzita, směrové účinky atd.
- *cesty šíření* hluku mezi zdrojem a posluchačem
- *posluchač*, u nějž posuzujeme míru škodlivosti hluku, subjektivní vjem a případně určíme limity expozice.

1.3.2. Veličiny charakterizující zvuk

Zvuk se šíří v daném prostředí ve formě vlnění. Směr jeho šíření určuje zvukový paprsek, který je kolmý k vlnoploše a který má tu vlastnost, že se může odrazet, případně lomit na hranicích dvou prostředí. Akustické vlnění se projevuje v daném prostředí změnami veličin charakterizujícími stav prostředí. Těmito veličinami jsou především kmitání částic prostředí kolem rovnovážné polohy, střídavé zhušťování a zředování prostředí, a s tím související změny tlaku, případně vnitřních napětí prostředí. [11]

Nejjednodušší případ časového průběhu některé z určujících veličin akustického děje je sinusový průběh znázorněný na obrázku. 1.7



Obrázek 1.7: Veličiny popisující jednoduchý akustický signál. [11]

$$A = A_{max} \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (1.15)$$

kde A je okamžitá hodnota určující veličiny v čase t , A_{max} je maximální hodnota této veličiny, φ je fázový úhel a t je čas. T nazýváme periodou, jejíž převrácená hodnota se rovná frekvenci kmitání f v hertzech.

V praxi se podle průběhu signálu určuje efektivní hodnota, která je měřítkem energie přenášené signálem. Je určena vztahem:

$$A_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T A^2 dt} \quad (1.16)$$

Pro sinusový signál platí: $A_{ef} = 0,707 A_{max}$. [11]

Střední hodnota signálu je dána vztahem:

$$A_{st} = \frac{1}{T} \int_0^T |A| dt \quad (1.17)$$

Pro sinusový signál platí že $A_{st} = 0,636 A_{max}$. [11]

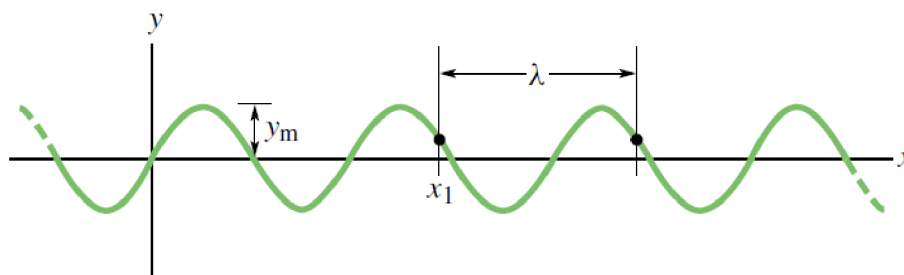
Akustický tlak

Akustické vlnění se projevuje především akustickým tlakem. Tento tlak působí buď na sluchový orgán posluchače nebo na měřicí přístroj. U jednoduchého zvukového signálu se sinusovým průběhem se akustický tlak mění stejně jako na obrázku 1.7. Akustický tlak je skalární veličina představující kladné a záporné odchylky od klidové hodnoty atmosférického tlaku. Akustický tlak značíme p . Pokud není stanoveno jinak, uvádí se efektivní hodnota. [11]

Je třeba zmínit, že v porovnání s atmosférickým tlakem (101 325 Pa) má akustický tlak nepatrnou velikost. Podle subjektivního vyšetření posluchačů je hodnota nejmenšího slyšitelného tlaku $2 \cdot 10^{-5}$ Pa a nejintenzivnějšího (takzvaný práh bolesti) asi 60 Pa. [11]

Vlnová délka

Vlnová délka (značena λ) je nejmenší vzdálenost, měřená ve směru šíření vlny, na které dochází k opakování tvaru vlny, jak je vyznačeno na obrázku 1.8.



Obrázek 1.8: Naznačení vlnové délky na sinusovém signálu. [13]

Vztah mezi vlnovou délkou a frekvencí, respektive periodou kmitání je následující:

$$\frac{c_s}{f} = \lambda = c_s T \quad (1.18)$$

kde c_s je rychlost šíření zvuku v daném prostředí. [11]

Intenzita zvuku a akustický výkon zdroje

Intenzita zvuku (značena I , jednotka $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) popisuje, jaká část akustické energie, šířící se akustickými postupnými vlnami, projde plochou 1 m^2 za jednu sekundu. V rovinném vlnění je intenzita dána součinem akustického tlaku a rychlosti šíření zvuku (taktéž v efektivní hodnotě): [11]

$$I = p v = \frac{p^2}{\rho c_s} = v^2 \rho c_s \quad (1.19)$$

Tento vztah platí pouze pro pole přímých vln. V poli odražených vln, kde existuje více směrů šíření, je vztah komplikovanější.

Pokud dochází k šíření zvuku větší plochou, například polokoulí, lze sečíst intenzity na dílčích plochách a určit celkový akustický výkon zdroje P_A :

$$P_A = \int_S I_{st} dS_E \quad (1.20)$$

V případě vyzařování do celého prostoru je plocha S_E rovna $4\pi r^2$. [11]

Hladina akustického tlaku

Jak bylo zmíněno výše, v rámci slyšitelného spektra nabývají hodnoty akustického tlaku řádově rozdílných hodnot ($2\cdot 10^{-5}\text{ Pa}$ pro práh slyšitelnosti až 60 Pa pro práh bolesti). Pokusy s vnímáním lidského sluchu ovšem ukázaly, že jeho sluchový vjem člověka nevzrůstá shodně s růstem těchto fyzikálních hodnot.

1.3. ZVUK, HLUK A ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

Na základě Weber-Fechnerova fyziologického zákona¹, který předpokládá, že smyslové vnímání člověka je úměrné logaritmu podnětu, se pro akustické veličiny používá logaritmická míra.

Nejdůležitější veličina vyjádřená logaritmicky (neboli hladinově) je *hladina intenzity zvuku* (značena L_P , jednotka dB): [11]

$$L_P = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (1.21)$$

kde p je efektivní hodnota akustického tlaku a p_0 je referenční hodnota akustického tlaku rovná $2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Stupnice pro hladinu akustického tlaku má nulovou hodnotu při akustickém tlaku $p = p_0$. Každé desetinásobné zvýšení akustického tlaku má za následek zvýšení hladiny akustického tlaku o 20 dB. [11]

Přehled o skutečných hodnotách akustického tlaku a hladiny akustického tlaku a jejich přirovnání k charakteristickému zdroji hluku je uveden v tabulce 1.3.2.

charakteristika hluku	akustický tlak [Pa]	hladina akust. tlaku [dB]
práh slyšitelnosti	0,000 02	0
tichý les	0,000 10	15
obývací pokoj	0,002 00	40
psaní na stroji	0,020 00	60
automobil	0,400 00	85
pneumatická vrtačka	2,000 00	100
tryskové letadlo	60,000 00	130
práh bolesti	100,000 00	135

Tabulka 1.1: Přehled hodnot akustického tlaku a hladin akustického tlaku. [11]

¹Weber-Fechnerův zákon charakterizuje vztah mezi fyzikální intenzitou podnětu působícího na receptor a subjektivním vjemem intenzity (počítkem), které toto působení vyvolá.

Subjektivně vnímaná malá změna počítku je přímo úměrná malé změně intenzity podnětu a nepřímo úměrná intenzitě počítku. Přidáme-li například ke třem gramům jeden gram navíc, bude vnímaná změna hmotnosti větší, než když přidáme jeden gram ke třem kilogramům. [14]

Hladina intenzity zvuku a akustického výkonu

Obdobně lze definovat také *hladinu intenzity zvuku*:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}; \quad I_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2} \quad (1.22)$$

kde I_0 je prahová intenzita zvuku, jež je mezinárodně stanovena jako nejmenší intenzita, kterou je lidský sluch schopen vnímat.

Poslední veličinou je *hladina akustického výkonu*:

$$L_P = 10 \log \frac{P_A}{P_0}; \quad P_0 = 10^{-12} \text{ W} \quad (1.23)$$

kde P je akustický výkon ve wattech a P_0 je referenční hodnota akustického výkonu. [11]

Váhové filtry

Dosud uvedené veličiny platí vždy pouze pro určitou hodnotu frekvence. Člověkem slyšitelné pásmo ovšem odpovídá frekvenčnímu rozsahu 20 až 20 000 Hz. Je proto potřeba vyhodnotit hladinu akustického tlaku v celém frekvenčním rozsahu. Pro takové měření celého slyšitelného spektra se používají čtyři druhy váhových filtrů, které upravují citlivost zvukoměru. Váhové filtry se značí velkými písmeny A, B, C, D a omezují přínos jednotlivých frekvenčních složek k určeným hladinám. [11]

Hladiny akustického tlaku vyhodnocené pomocí těchto filtrů se označují jako hladiny zvuku L_A , L_B atd. Pro běžná měření se preferuje váhový filtr A jako filtr, který nejuvěrněji vystihuje citlivost lidského ucha. Lidský sluch má největší citlivost v rozsahu 1000 až 4000 Hz, mimo toto pásmo citlivost klesá. [15] [11]

Hladina zvuku je veličinou určenou na základě empirických šetření řady osob, nemá proto přesný fyzikální smysl. Její výhodou ovšem je, že popisuje hlučnost jediným číslem. Pokud nelze L_A přímo změřit, lze ji vypočítat z frekvenčního spektra tak, že se hladiny akustického tlaku v pásmech korigují podle příslušné váhové křivky a poté se jednotlivá pásma logaritmičticky sčítají podle vzorce:

$$L_A = 10 \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{pi} + A_i}{10}} \right) \quad (1.24)$$

kde L_{pi} jsou odpovídající hladiny akustického tlaku ve frekvenčních pásmech a A_i jsou příslušné korekce váhového filtru A uvedené v tabulce 1.2. [11]

stř. frekvence pásma f [Hz]	rel. zisk váhového filtru A [dB]	stř. frekvence pásma f [Hz]	rel. zisk váhového filtru A [dB]
25	-44,7	800	-0,8
31,5	-39,4	1000	0
40	-34,6	1250	0,6
50	-30,2	1600	1,0
63	-26,2	2000	1,2
80	-22,5	2500	1,3
100	-19,1	3150	1,2
125	-16,1	4000	1,0
160	-13,4	5000	0,5
200	-10,9	6300	-0,1
250	-8,6	8000	-1,1
315	-6,6	10000	-2,5
400	-4,8	12500	-4,3
500	-3,2	16000	-6,6
630	-1,9	20000	9,3

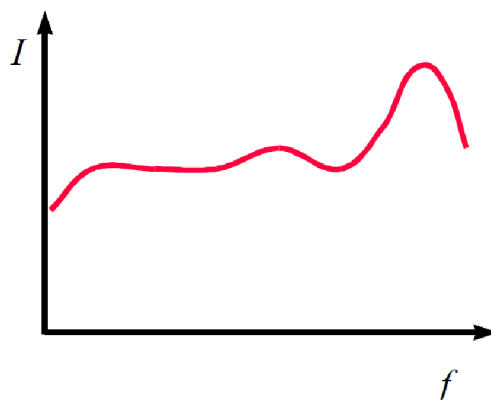
Tabulka 1.2: Kmitočtové charakteristiky filtru A. [11]

1.3.3. Typy spekter

Spektra rozlišujeme podle frekvenčního složení akustického tlaku. [11] [16]

Spojité spektrum

U spojitého spektra jsou frekvenční složky hluku spojitě rozloženy kolem jednoho nebo více maxim. Příkladem mohou být například ventilátory nebo motory proudových letadel. U těchto zdrojů hluku spolu jednotlivé složky těsně sousedí a proto spojitě pokrývají celý frekvenční rozsah. [11]

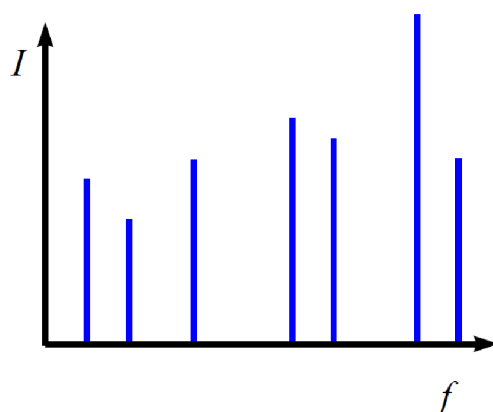


Obrázek 1.9: Spojité spektrum [16]

Diskrétní spektrum

Diskrétní spektrum obsahuje řadu frekvenčních složek. Frekvence je dána veličinami zdroje hluku, například součinem otáček spalovacího motoru a počtem válců nebo součinem otáček vrtule a počtem listů vrtule, a podobně. Akustická energie je potom soustředěna ve složkách s těmito frekvencemi, které označujeme jako diskrétní. [11]

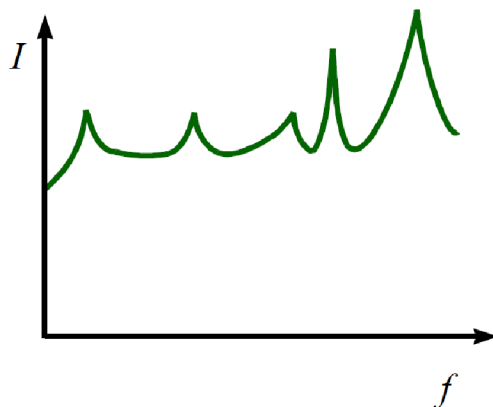
Lidské ucho je schopno přibližně rozeznat frekvenci a intenzitu těchto složek. [11]



Obrázek 1.10: Diskrétní spektrum [16]

Smíšené spektrum

Spojením předchozích dvou spekter dostaneme smíšené spektrum. Tomuto spektru také odpovídá hluk většiny strojních zařízení. [11]



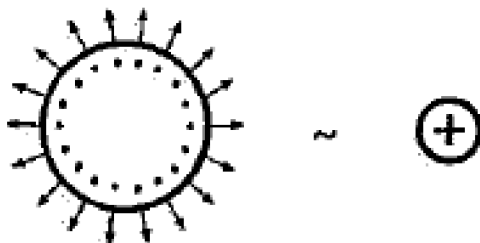
Obrázek 1.11: Smíšené spektrum [16]

1.4. Základní typy zdrojů zvuku

Na základě předchozích studií [17] můžeme zdroje zvuku rozdělit do následujících kategorií: monopóly, dipóly a kvadrupóly. Tyto takzvané elementární typy zdrojů zvuku se používají pro řešení pohybových rovnic v klasické teorii akustiky malých rozruchů plynu působících na okolí. Tato teorie je zjednodušená, neboť reálným zdrojem zvuku je vždy plocha.

1.4.1. Monopól

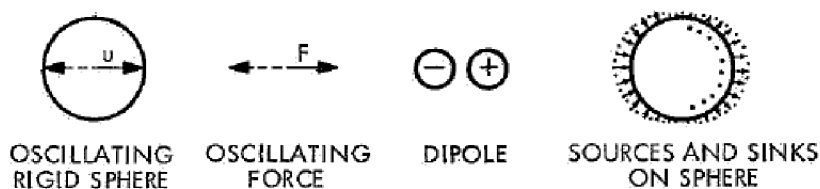
Jde o nejjednodušší typ zdroje zvuku. V tomto případě je zdrojem zvuku pulzující koule reprezentovaná jedním bodem v prostoru. Zvuk je generován odtokem hmoty ze zdroje. Jako příklad si můžeme představit prasknutí nafouklého balónku. Tento typ zdroje se u vrtulí nevyskytuje. [17]



Obrázek 1.12: Pulzující koule v prostoru znázorňující model monopólového zdroje hluku. [17]

1.4.2. Dipól

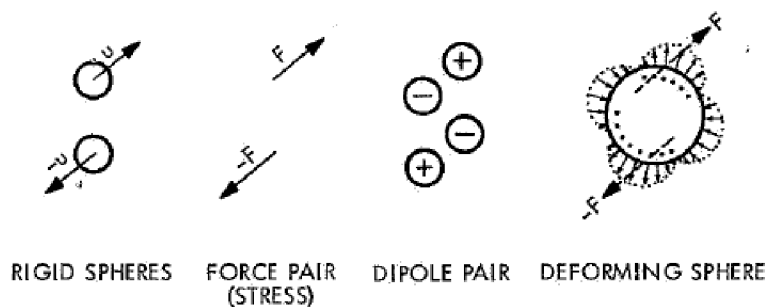
Druhý nejjednodušší zdroj zvuku je dipól. Dipól si lze přestavit jako kouli, která je v jednom směru natahována, nebo jako oscilující kouli či sílu. Intenzita dipólu je vektorově orientovaná. Příklady dipólového zdroje zvuku u vrtulí jsou například od krouťícího momentu (indukovaného odporu) nebo od tloušťky profilu. [17]



Obrázek 1.13: Modely dipólového zdroje zvuku.[17]

1.4.3. Kvadrupól

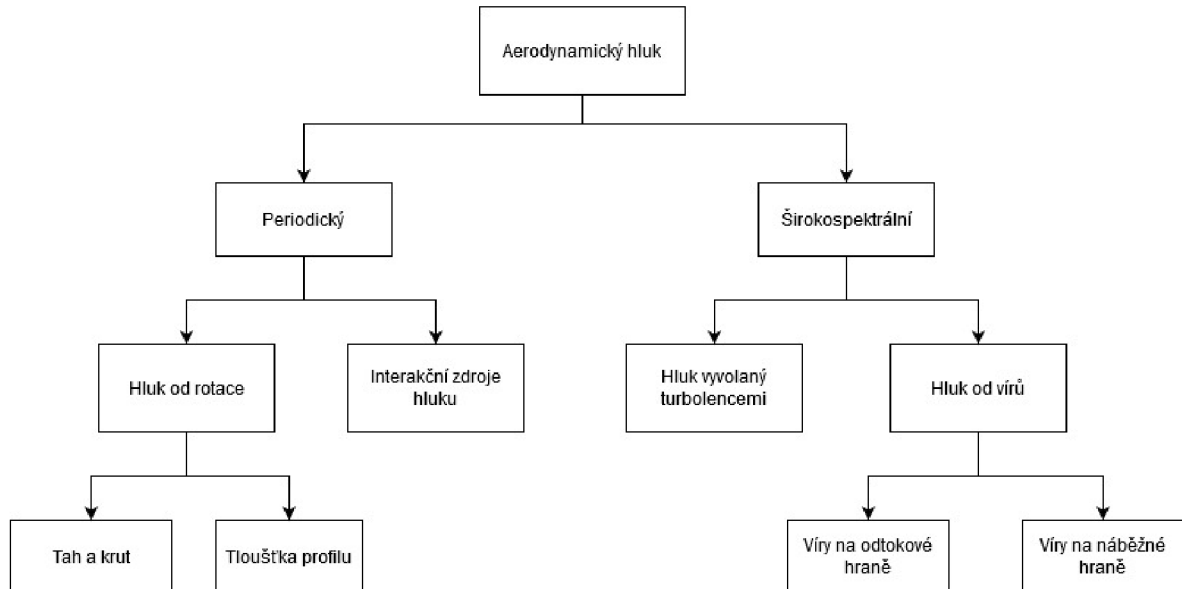
Kvadrupól si lze představit jako kouli, která je v jednom směru natahována a v druhém smršťována. Jedná se vlastně o dva dipóly v opačné fázi. Ekvivalentně se jedná o dvojici sil působících v opačném směru na protilehlých stranách, kde každá síla reprezentuje jeden dipól. Příkladem kvadrupólového zdroje zvuku je například hluk od úplavu nebo hluk od tahu. [17]



Obrázek 1.14: Modely kvadrupólového zdroje hluku.[17]

1.5. Zdroje aerodynamického hluku

Aerodynamický hluk můžeme definovat jako zvuk, který vzniká pohybem pevného objektu skrz kapalinu. Hluk od vrtule lze obecně rozdělit na hluk periodický a širokospektrální, viz obrázek 1.16.



Obrázek 1.15: Rozdělení aerodynamických zdrojů hluku u vrtulí. [17]

Periodický neboli rotační zdroj hluku zahrnuje všechny zvuk, který má původ v diskrétních frekvencích průchodu listů vrtule a jejich vyšších harmonických frekvencích.

Širokospektrální hluk popisuje zdroje hluku způsobené nestabilním tlakovým polem. Tyto nestability vznikají kvůli vírům na odtokové hraně a na koncích vrtule. [17]

1.5.1. Hluk od rotace

Hluk od tahu a kroutícího momentu

Reálné profily s určitou tloušťkou způsobují rozdíly v tlaku při průchodu kapalinou. Tyto tlakové rozdíly způsobují tahovou sílu ve směru kolmém na plochu rotace vrtule a kroutící moment v ploše rotace vrtule. Tlakové pole kolem listu je vzhledem k listu stabilní a rotuje spolu s ním za podmínky ustáleného proudění.

Pozorovatel v pevném bodě na disku reprezentujícím rotující vrtuli bude dané rotující tlakové pole vnímat jako oscilující tlak. Frekvence oscilace bude záviset na frekvenci průchodu listu daným bodem a tvar vlny bude záviset na tvaru rozložení tlaku podél těhivý profilu listu.

Rotující profily generující hluk od tahu a kroutícího momentu lze analyticky nahradit řadou stacionárních dipólů, které se aktivují při průchodu listu vrtule.

Pro případ neustáleného proudění, například při ustáleném dopředném letu (kdy je potřeba vzít v úvahu rozdíl rychlosti při pohybu vrtule dopředu a zpět vzhledem k nabíhajícímu proudění), je nutné upravovat úhel nastavení profilu listu, aby bylo docíleno stabilního vztaku po celé délce listu. Tato úprava je nutná například u helikoptér při ustáleném dopředném režimu letu. [17]

Hluk od tloušťky profilu

Při průchodu listu o nenulové tloušťce kapalinou je element kapaliny fyzicky posunut. Toto periodické posouvání hmoty je ekvivalentní periodickému přidávání a ubírání hmoty v blízkosti disku.

Množství přírůstku hmoty je určeno profilem listu, úhlem nastavení profilu listu a jeho rychlostí. Hluk od tloušťky profilu je oproti hluku od tahu a momentu malý. Při vysokých rychlostech na koncích listů ovšem může mít srovnatelnou váhu s hlukem od tahu. [17]

1.5.2. Interakční zdroje hluku

Tyto periodické zdroje hluku se obvykle objevují u vrtulí helikoptér. Mohou se ovšem v menší míře vyskytovat i u ventilátorů a vrtulí pro UAV.

Interakční jevy

Jedná se o periodický zdroj hluku o vysokých amplitudách způsobený fluktuacemi sil na listech vrtule.

Mechanismy vzniku těchto fluktuací mohou být interakce listu s vírem nebo periodické odtrhávání a přiléhání proudu vzduchu na listu. Tyto mechanismy mohou nastat při průchodu listu vírem nebo úplavem vytvořeným předchozím listem.

Při vysokých rychlostech na koncích vrtulového listu (např. v případě helikoptéry letící vysokou dopřednou rychlostí) dochází také k interakčním jevům.

Pokud dochází k interakčním jevům, jedná se vždy o dominantní zdroj hluku vrtule. [17]

Amplitudová a frekvenční modulace

Periodické přibližování a vzdalování zdroje hluku vzhledem k detektoru zvyšuje celkový hluk. Změna frekvence způsobená pohybem zdroje hluku vzhledem k posluchači (Dopplerův jev) také ovlivňuje celkovou hladinu hluku. [17]

Interakce úplavu s proudovým polem

V případě ventilátoru s předsazeným statorem se rotor pohybuje v úplavu od lopatek ventilátoru. Rotor je v takovém případě zdrojem periodického hluku. [17]

1.5.3. Hluk vyvolaný víry

Tento zdroj hluku je dominantní mezi širokopásmovými zdroji hluku. Je definován jako hluk vytvářený formováním vírů v proudu za listem.

Při obtékání vzduchu kolem válce v rozsahu Reynoldsova čísla od 10^2 do 10^5 vznikají víry, které jsou funkcí průměru válce a rychlosti nabíhajícího proudu. Tento princip platí i pro rotující profil. Rychlost nabíhajícího proudu vzduchu se podél délky listu mění, a proto vzniká hluk v širokém pásmu frekvencí. Výsledkem je dipól, jehož síla je úměrná šesté mocnině rychlosti nabíhajícího proudu. Nejvyšší amplitudu proto mají frekvence se zdrojem na konci listu.

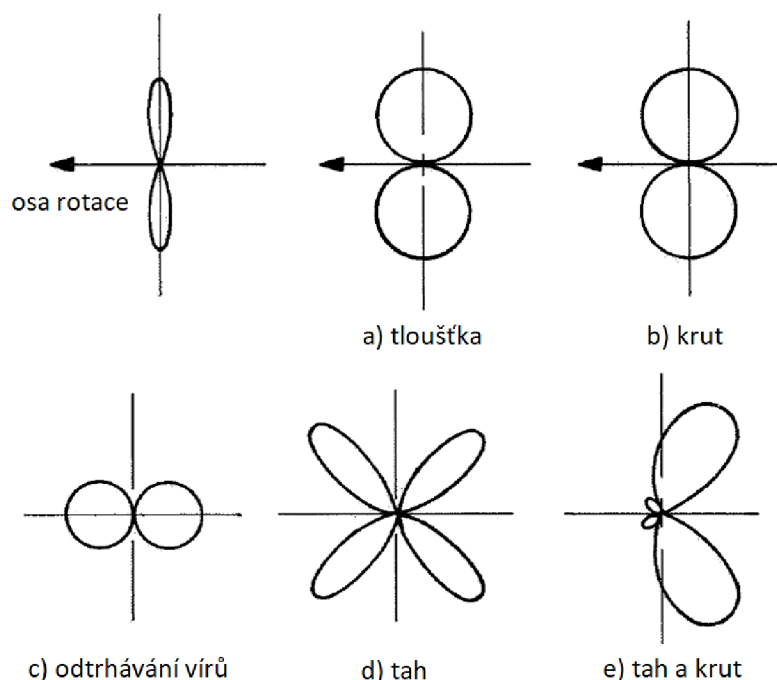
Díky tomu že list vrtule generuje tah, vznikají na jeho konci víry (úměrné gradientu tahu). Dipól těchto vírů po interakci s víry od odtokové hrany dohromady tvoří hluk vyvolaný víry. [17]

1.5.4. Hluk indukovaný turbulencemi

Při proudění kapaliny obsahující mezní vrstvy se pohybem turbulence v malém měřítku vytváří náhodný hluk. Protože se jedná o kvadrupól, který je neefektivně šířený, je obtížné jej na pozadí dalších zdrojů hluku detekovat. Díky interakci turbulencí s tlakovým polem pohybuje se listu ovšem dochází k zesílení tohoto typu hluku. [17]

1.6. Výpočet hluku vrtule

Jak je zmíněno v [17], hlavním zdrojem hluku vrtulí bývá zpravidla hluk od tahu a kroučícího momentu. Tvary akustických polí od jednotlivých zdrojů hluku spolu s hlavním zdrojem hluku od tahu a kroučícího momentu jsou uvedeny na obrázku 1.16. Z něj je patrná nejvyšší intenzita hluku ve směru 120° od osy rotace vrtule.

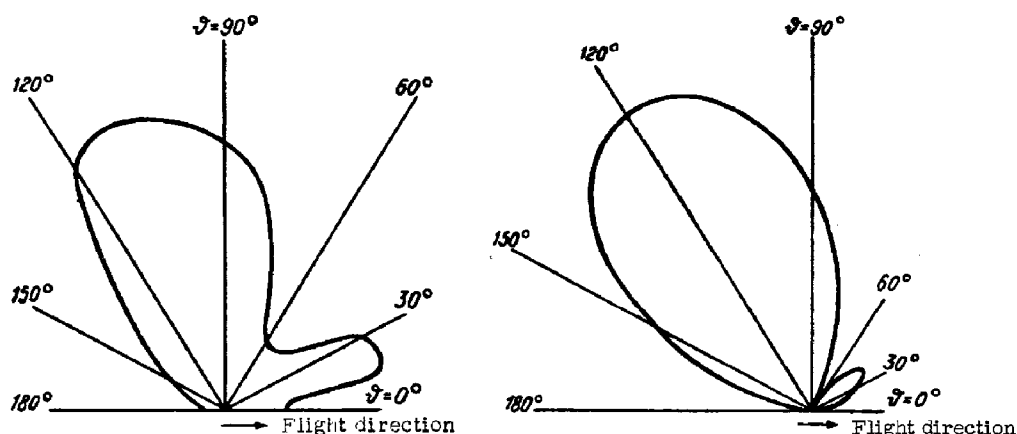


Obrázek 1.16: Teoretické tvary akustických polí rotorů, vrtulí a ventilátorů. Upraveno a převzato z [17].

Pro určení tvaru akustického pole rotující vrtule generující tah existuje následující rovnice: [18]

$$p = \frac{mN_b\omega}{2\pi z c_s} \left[\frac{c_s M}{(0,8R)^2\omega} - T \cos(\vartheta) \right] J_{mb} \left(\frac{1}{c} mN_b\omega 0,8R \sin(\vartheta) \right) \quad (1.25)$$

kde m je řád harmonické frekvence, c_s rychlost zvuku, z a ϑ polární souřadnice místa pozorovatele a J_{mb} je Besselova funkce s příslušným argumentem. Porovnání výsledku rovnice s experimentem je uvedeno na obrázku 1.17.



Obrázek 1.17: Srovnání naměřené (vlevo) a spočtené (vpravo) intenzity akustického pole. [18]

1.7. Režimy obtékání profilu

1.7.1. Reynoldsovo číslo

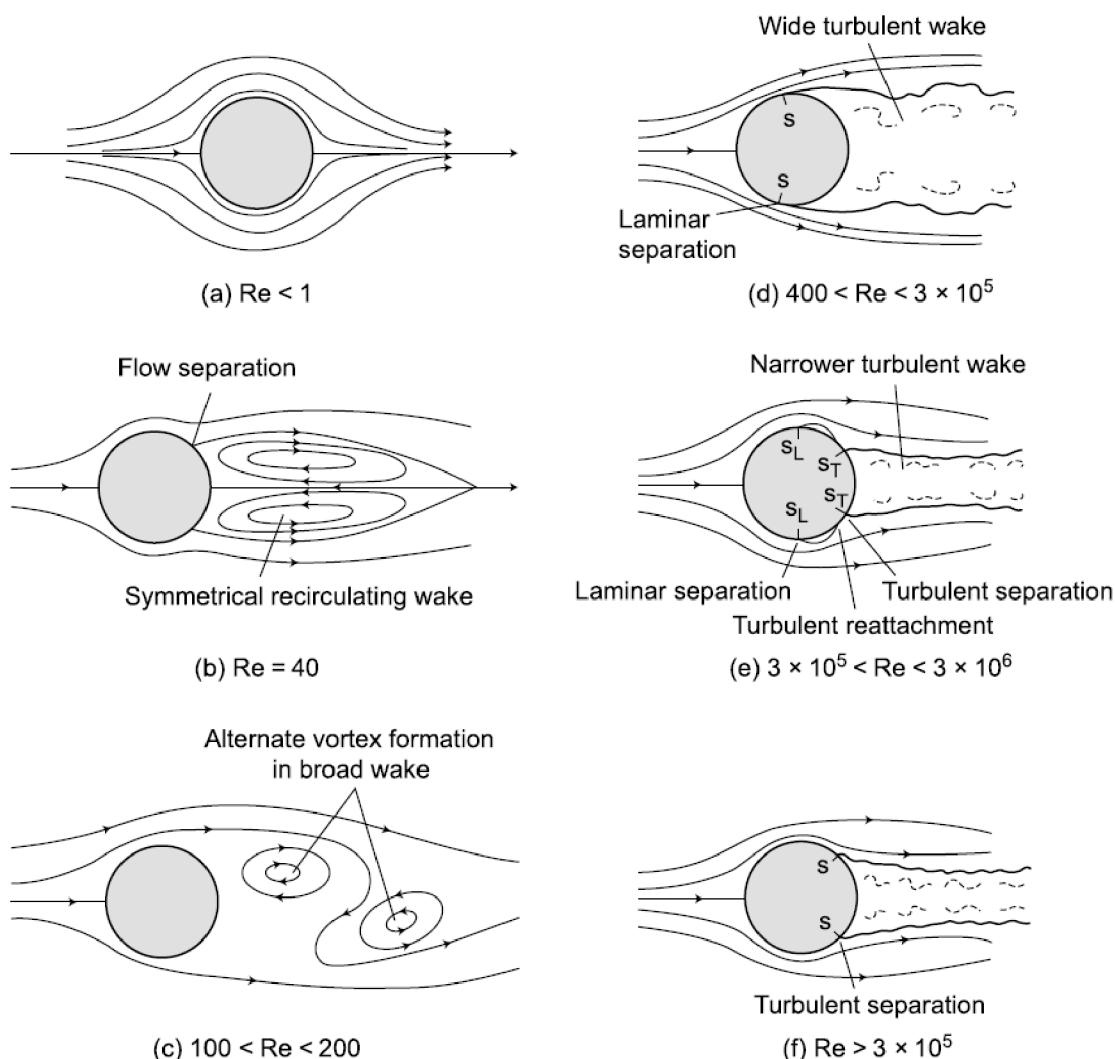
Na základě sledování obtékání vzduchu kolem válce bylo vypořazováno, že odpor, který obtékáný válec klade, je závislý na ploše průřezu úplavu, který za válcem vzniká. Režim obtékání válce je charakterizován *Reynoldsovým číslem*. [9] [24]

Reynoldsovo číslo je bezrozměrná veličina, která dává do souvislosti setrvačné síly a viskozitu (odpor prostředí v důsledku vnitřního tření). V případě režimu obtékání válce, který lze vztáhnout také pro určení režimu obtékání profilu, lze Reynoldsovo číslo vypočítat následovně:

$$Re = \frac{v_a d}{\nu} \quad (1.26)$$

kde d je hloubka profilu nebo průměr obtékaného válce a ν je kinematická viskozita vzduchu v $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Kinematická viskozita je závislá na teplotě vzduchu, její hodnota pro 20°C je $15,11 \cdot 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$. [9] [19]

Jaký vliv má hodnota Reynoldsova čísla na obtékání jednoduchých těles, například nekonečně dlouhého válce, je znázorněno na obrázku 1.18.



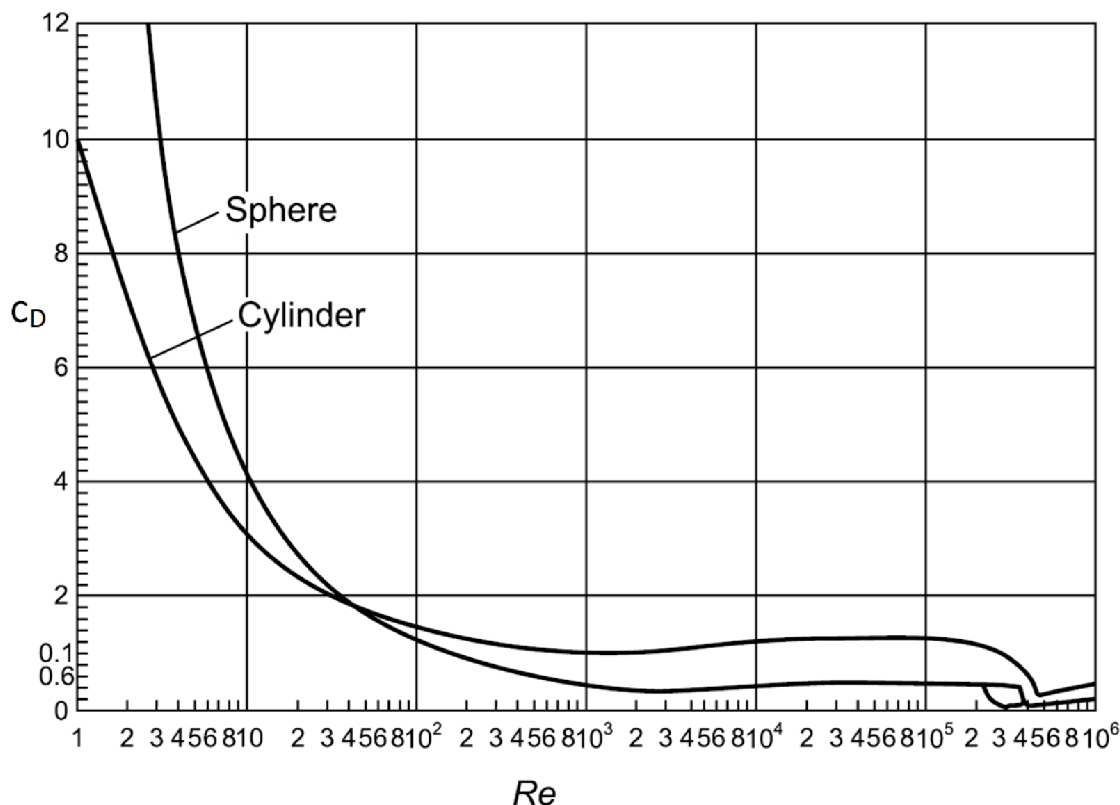
Obrázek 1.18: Režimy obtékání válce v závislosti na Reynoldsově čísle. a) plně laminární obtékání, b) vznik separace proudění a formování symetrických vírů, c) periodické odplouvání vírů (Kármánovy víry), d) laminární separace s širokým turbulentním úplavem, e) laminární separace proudění s turbulentním přilnutím a následnou turbulentní separací e) čistě turbulentní separace proudění. [9]

1.7.2. Obtékání profilu

Ne všechny režimy nastávající při obtékání válce najdeme i u profilů. Například střídavé odplouvání vírů se u profilů nevyskytuje.

S Reynoldsovými čísly menšími než 1 se setkáme pouze u poletujících částic kouře, prachu nebo mlhy. Proudění kolem objektu je kompletně laminární. [21]

V rozsahu Reynoldsových čísel do 10 000 se pohybuje většina hmyzu během letu. Dosáhnout turbulentní mezní vrstvy je velmi obtížné. Hmyz je pro létání v tomto režimu



Obrázek 1.19: Přibližné hodnoty koeficientu odporu v závislosti na Reynoldsově čísle pro kouli a nekonečně dlouhý válec. [9]

přizpůsoben, například vážky mají na povrchu křídél zoubky, které drží proudění přilnuté na křídlech. [21]

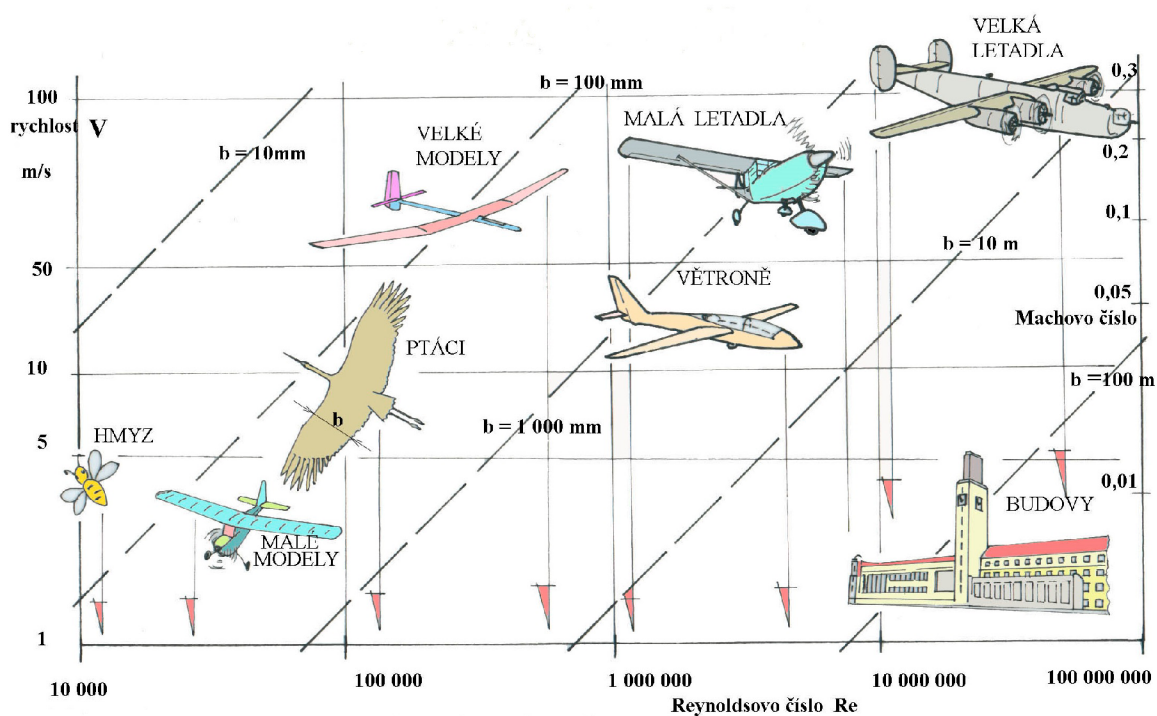
Reynoldsových čísel do 70 000 obvykle dosahují zmenšené modely letadel. Právě na modelech letadel může při drobné změně geometrie za letu dojít k laminárnímu odtržení bez opětovného přilnutí. To má za následek náhlou ztrátu ovladatelnosti. Pro větší modely letadel pohybující se vyšší rychlostí riziko ztráty ovladatelnosti klesá. Opětovného přilnutí proudění lze dosáhnout úpravou nosných ploch zmíněných v kapitole 1.8. [21]

V rozsahu Reynoldsových čísel od 70 000 do 200 000 se výrazně zvyšuje účinnost profilu. Profily s tloušťkou nad 12 % již obvykle nepotřebují úpravu nosných ploch. Stále se zde ovšem vyskytují laminární separační bubliny snižující účinnost profilu. [21]

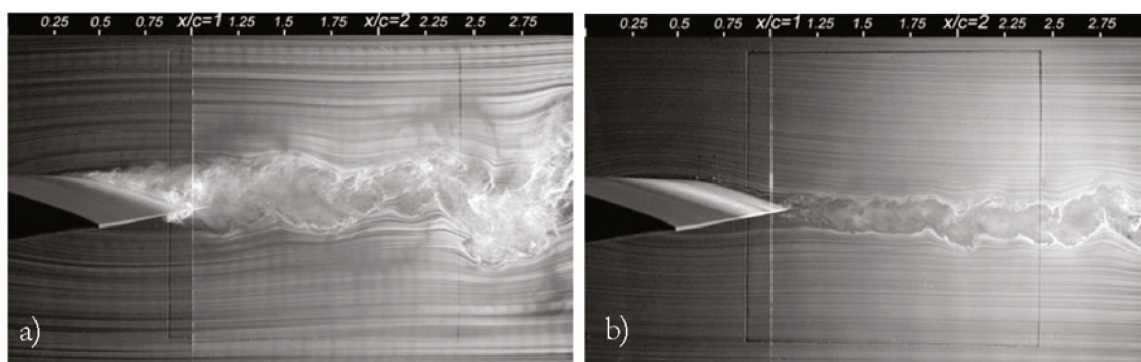
Laminární separační bubliny se mohou vyskytovat až do Reynoldsova čísla 700 000. V tomto rozsahu se pohybují například velké modely letadel nebo ptáci. [21]

Vyšších Reynoldsových čísel (nad 700 000 až do řádů jednotek nebo desítek milionů) dosahují cestovní letouny, torpéda, případně vojenské ponorky. Koeficient odporu profilu v tomto rozsahu mírně roste, stále je ovšem výrazně nižší, než pro modely letadel nebo vrtule UAV. [21]

1.7. REŽIMY OBTÉKÁNÍ PROFILU



Obrázek 1.20: Příklady hodnot Reynoldsových čísel pro různé objekty. [22]

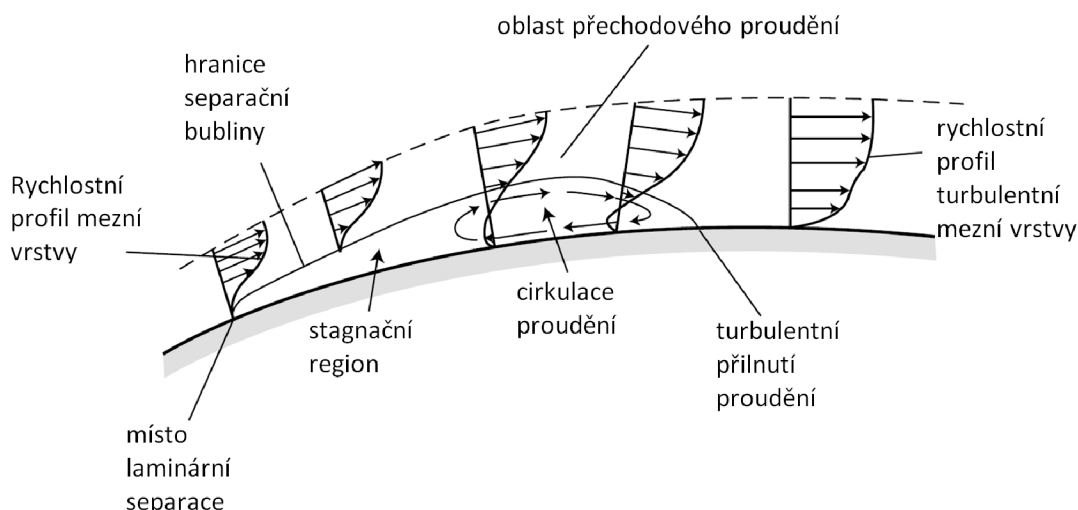


Obrázek 1.21: Vizualizace proudění kolem profilu NACA 0025 pro Reynoldsova čísla a) 55 000 a b) 210 000 při úhlu náběhu 5° . Zvýšení Reynoldsova čísla má za následek přilnutí proudění. [20]

1.7.3. Laminární separační bubliny

Laminární separační bubliny, také nazývány zkráceně pouze separační bubliny, vznikají v určitém intervalu Reynoldsových čísel kvůli přechodové fázi mezi laminárním a turbulentním prouděním na profilu. Odtržení laminárního proudění a vznik separační bubliny jsou hlavní důvody snížení účinnosti profilu s rostoucím Reynoldsovým číslem. [23]

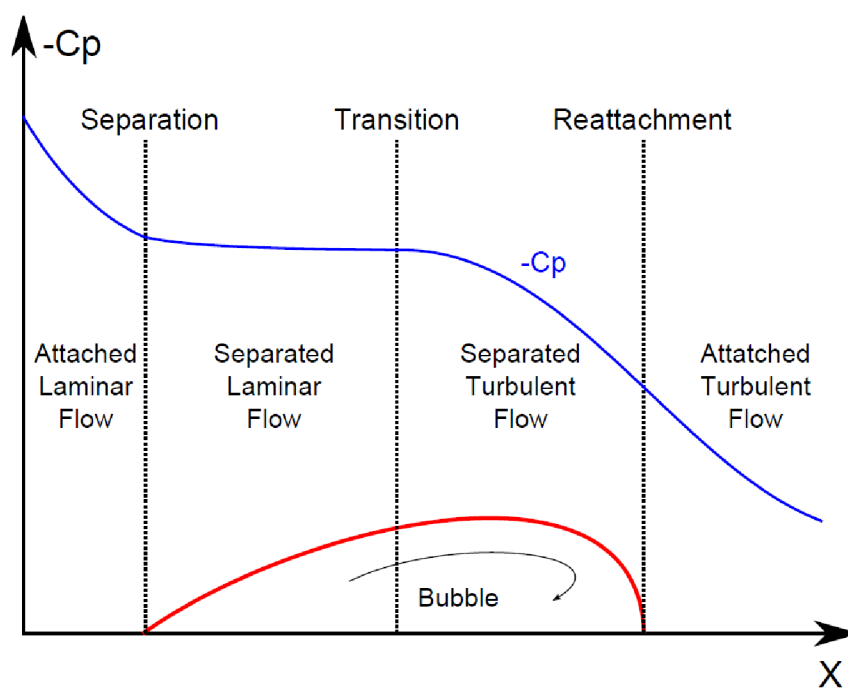
V přechodové fázi dochází k izolaci kapaliny mezi místem separace a opětovného přilnutí proudění. V rámci bubliny obvykle existují dva režimy. Blíže k náběžné hraně se vyskytuje stagnační region, neboli kapsa, ve které se kapalina nehýbe. Dále po proudu dochází k cirkulaci kapaliny spolu s výrazným nárůstem tlaku. [9]



Obrázek 1.22: Znázornění a popis laminární separační bubliny. Upraveno a převzato z [9]

Existují dva druhy separačních bublin:

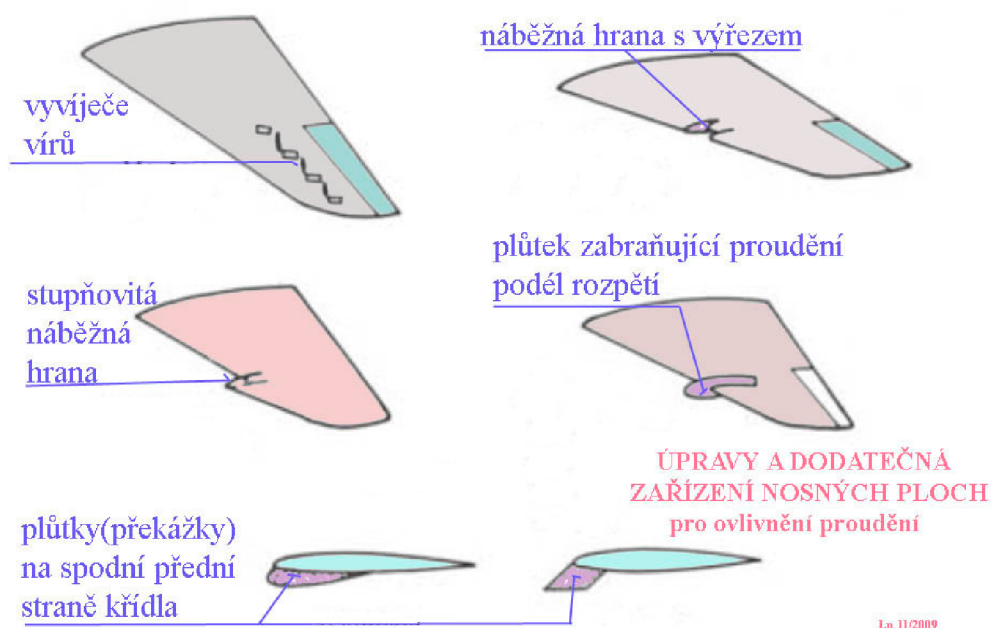
- Krátké bubliny o délce do 1 % délky tělivity, které nemají významný vliv na rozložení tlaku po profilu a na jeho celkovou účinnost. Zvýšení úhlu náběhu má za následek posunutí bubliny proti proudu. [9]
- Dlouhé bubliny, které mohou mít délku od jednotek procent až přes celý profil. Při zvyšování úhlu náběhu se délka bubliny prodlužuje. Bublina se může rozšířit až na odtokovou hranu. Dlouhé separační bubliny snižují koeficient vztlaku a odtržení proudu. [9] Vliv separační bubliny na rozložení tlaku po profilu je uveden na obrázku 1.23.



Obrázek 1.23: Fáze přechodového proudění a jejich vliv na hodnoty tlaku po délce profilu. [34]

1.8. Možnosti úpravy nosných ploch

Aerodynamické charakteristiky listů vrtulí (zde uvažovaných jako nosné plochy) lze kromě geometrických parametrů, jako jsou typ profilu, úhel náběhu po rozpětí, šípovitost a podobně, upravovat také prvky k řízení proudění, viz obrázek 1.24. Proud vzduchu se kolem nosné plochy může pohybovat trojrozměrně. Proto mohou vznikat nežádoucí typy a směry proudění, které mají negativní vliv na letové vlastnosti. Cílem těchto úprav je zamezení či alespoň omezení nežádoucího typu nebo směru proudění. [26]

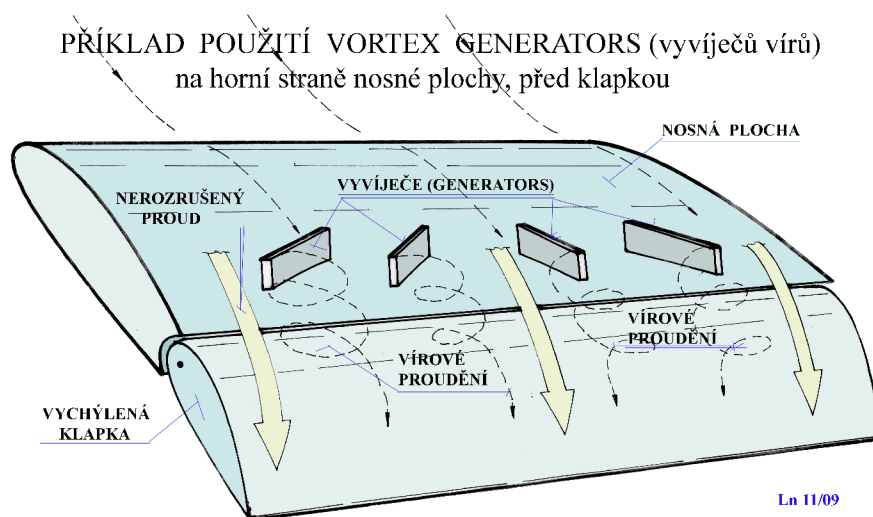


Obrázek 1.24: Úpravy a dodatečná zařízení nosných ploch pro ovlivnění proudění. Upraveno a převzato z [26].

1.8.1. Vortex generator

Smyslem vortex generátorů neboli vyvíječů vírů je vytvořit řízené zvíření proudu v některém místě nebo ploše. Umísťují se do těch částí nosných ploch, kde má dojít k oživení energie proudu a díky tomu k lepšímu obtékání daného místa. [26]

Překážky ve formě tenkých ploch postavených kolmo k nosné ploše mohou svírat i úhel se směrem nabíhajícího proudu vzduchu. Víry způsobené těmito překážkami předávají energii do mezní vrstvy. Takto povzbuzený proud lépe přilne a proudí kolem zakřivených ploch například při vychýlení vztlakových klapek, viz obrázek 1.25. [26]



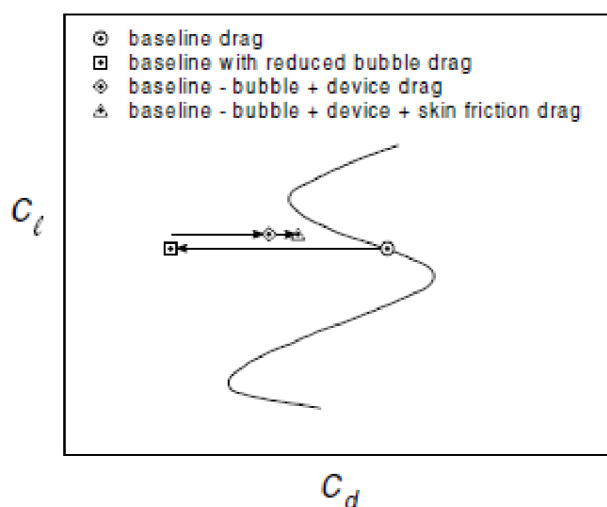
Obrázek 1.25: Příklad použití vortex generátorů. Upraveno a převzato z [26].

Třebaže se vortex generátory používají například na listech větrných turbín [27], na vrtule pro letouny typu UAV nejsou vhodné. Tyto vrtule se většinou vyrábí z vláknových kompozitů a příliš složité formy by komplikovaly výrobu a neúměrně zvyšovaly hmotnost vrtule. Dodatečné připevnění vortex generátorů je kvůli vysokým odstředivým silám během provozu vrtule komplikované a nebezpečné svému okolí. Přidaná hmota na listu vrtule také komplikuje vyvážení vrtule, které má výrazný vliv na vibrace a celkovou hlučnost vrtule. [11]

1.8.2. Turbulátor

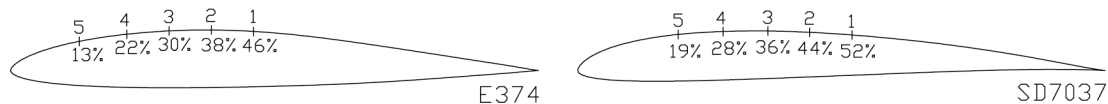
Vznik separačních bublin vysvětlený v kapitole 1.7.3 na profilech pro nízká Reynoldsova čísla způsobuje snížení účinnosti profilu a nepravidelný tvar poláry, jak je naznačeno na obrázku 1.26.

K eliminaci separačních bublin a zlepšení účinnosti profilů pro nízká Reynoldsova čísla lze použít turbulátor (anglicky *boundary layer strip* nebo *turbulator strip*). Turbulátor umístěný na horní přední část nosných ploch způsobuje výměnu energie mezi částicemi vzduchu v mezní vrstvě a mimo ni. Jako turbulátory lze použít například dráty, pásky rovné nebo speciálně tvarované, zdrsnění povrchu a podobně. [28]



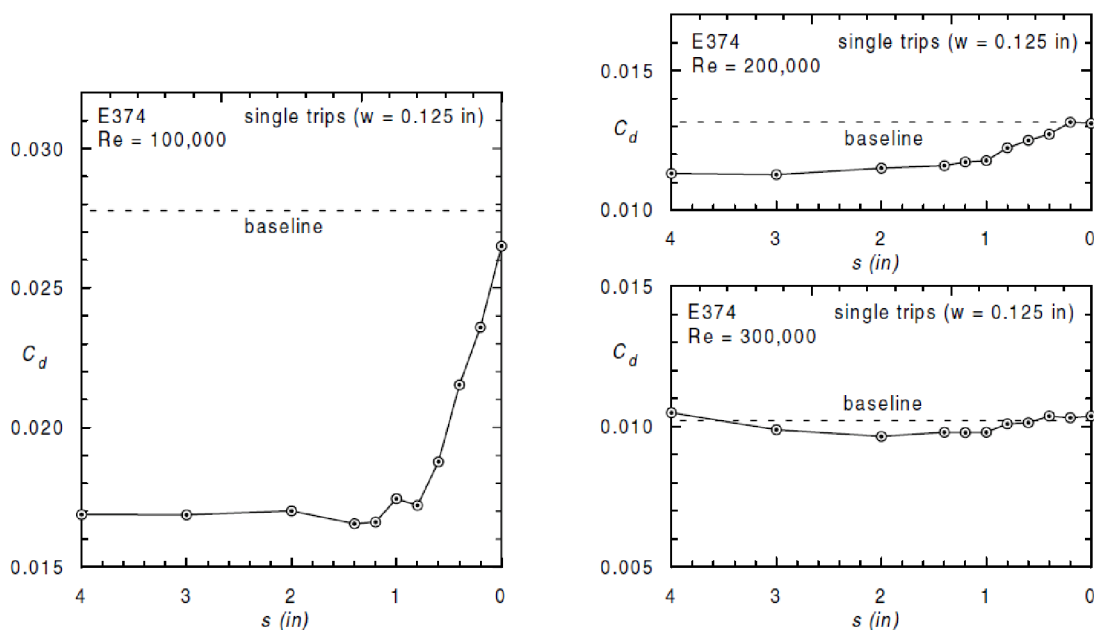
Obrázek 1.26: Vliv redukce separační bubliny na tvar poláry profilu. [28].

Výsledky Sodermanova měření 1.27 ukázaly velké snížení odporu pro Reynoldsovo číslo $1 \cdot 10^5$ při použití turbulátorových pásek. Experimenty byly prováděny na dvou profilech o stejné délce tělivity 30,48 cm. Bod separace neboli odtržení proudu byl určen pomocí programu XFoil. Turbulátorová páska byla umístěna tak, aby konec pásky byl 2,5 mm před předpokládaným místem vzniku separační bubliny. Dále byla páska posunuta vždy o 25 mm blíž směrem k náběžné hraně, viz obrázek 1.27.



Obrázek 1.27: Umístění turbulátorových pásek na profilech E374 a SD7037 [28].

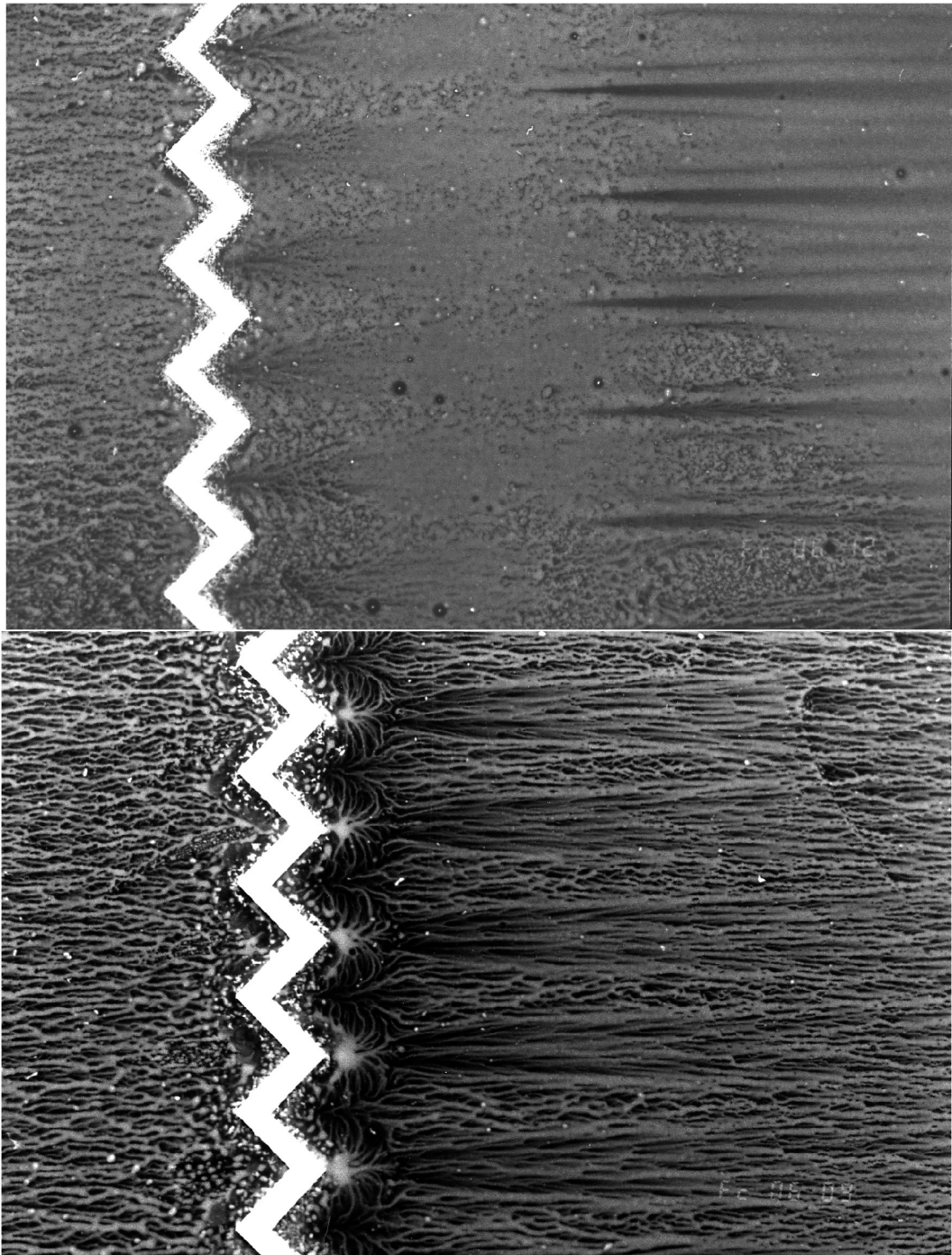
Výsledky měření ukazují pozici turbulátoru jako stěžejní parametr, jak je patrné z obrázku 1.27. Použité turbulátorové pásky měly ve směru proudění šířku 3,175 mm a výšku 0,33 mm. Turbulátorová páska musí být umístěná v dostatečném předstihu před bodem vzniku separační bubliny. Pokud je umístěná příliš blízko nebo až za bodem vzniku separační bubliny, její účinnost významně klesá. [28]



Obrázek 1.28: Závislost koeficientu odporu na pozici turbulátorové pásky pro Reynoldsova čísla $1 \cdot 10^5$, $2 \cdot 10^5$ a $3 \cdot 10^5$. $s = 0$ odpovídá pozici 46 % délky tělivity a $s = 4$ odpovídá 13 % délky tělivity. [28]

Obrázek 1.29 porovnává použité 3D pilovité pásky o různých tloušťkách. U tenčí pásky nelze rozhodnout, jestli došlo k eliminaci separační bubliny. Zvětšení tloušťky na dvojnásobek má za následek vytvoření turbulentních „klínů“ tvořících se za zadními špičkami pásky. Prostor mezi klíny se zdá být tvořen přilnutým laminárním prouděním v místech s výskytem separační bubliny. [28]

Co se tvaru turbulátoru týče, provedené experimenty ukazují nízký vliv tvaru turbulátoru a potvrzují jeho tloušťku a pozici jako dominantní faktory turbulátorů. [23] Pro oživení mezní vrstvy lze také použít zdrsňení povrchu. Podle předchozích měření nezáleží, jestli je hrubý povrch rovnoměrný po celém profilu nebo pouze na části profilu. [23]



Obrázek 1.29: Vizualzace proudění na profilu E374 s pilovitou turbulátorovou páskou o různých tloušťkách (0,38 a 0,76 mm) v pozici $x/c = 30\%$, $Re = 200\,000$. [28]

1.9. Dosavadní poznatky o snižování hluku vrtulí

Studie zabývající se hlukem rotorů a vrtulí se shodují, že snížení hluku lze účinně docílit zvýšením průměru vrtule nebo zvýšením počtu listů. Dále také úpravou geometrie listů použitím tenkých profilů. [11] [17]

Změna výše uvedených parametrů ovšem ovlivňuje celkový výkon a účinnost pohonného ústrojí, případně může být limitována konstrukčními parametry celého zařízení. Následuje proto výčet několika přístupů, které lze při návrhu tiché vrtule použít.

1.9.1. Mezioborový přístup k návrhu tiché vrtule

Jedním ze způsobů, jak snížit hluk vrtule je systematický postup při návrhu geometrických a aerodynamických parametrů. Ty samé parametry ovšem ovlivňují účinnost celého pohonného ústrojí. Účinnost a snížení hluku působí v návrhu vrtule protichůdně. Je proto nutné využít mezioborové optimalizace návrhu (Multidisciplinary Design Optimization, MDO). [29]

1.9.2. Návrh vrtule pro konkrétní provozní stav

Jednou z tradičních metod návrhu vrtule je Betzova práce [30]. Tato metoda optimalizuje geometrii pro konkrétní provozní stav (rychlost letounu, nadmořská výška, otáčky vrtule,...). Tah vrtule je pro daný příkon za daných podmínek maximalizován. Jako příklad slouží návrh vrtule pro první let kolem světa bez mezipřistání a dotankování. [31]

1.9.3. Započítání celé pohonné jednotky

Jiný výzkum využívající mezioborovou optimalizaci návrhu tiché vrtule [32] ukázal, že hlučnost pohonného ústrojí nezávisí pouze na parametrech vrtule, ale také na účinnosti pohonné jednotky a na parametrech letounu.

Například upřednostnění hlučnosti před ostatními parametry mělo za následek nepraktický návrh vrtule s příliš dlouhou tětvou profilu. Taková vrtule použitá na testovacím letounu měla za následek snížení maximální doby letu ze 160 minut na 25 minut. Při návrhu tiché vrtule je tedy nutné vzít v potaz i spotřebu energie. [32]

Naopak přílišný důraz na příkon má za následek zvýšení otáček vrtule, které sice vede k větší účinnosti propulzního systému, má ovšem negativní efekt na výslednou hlučnost.

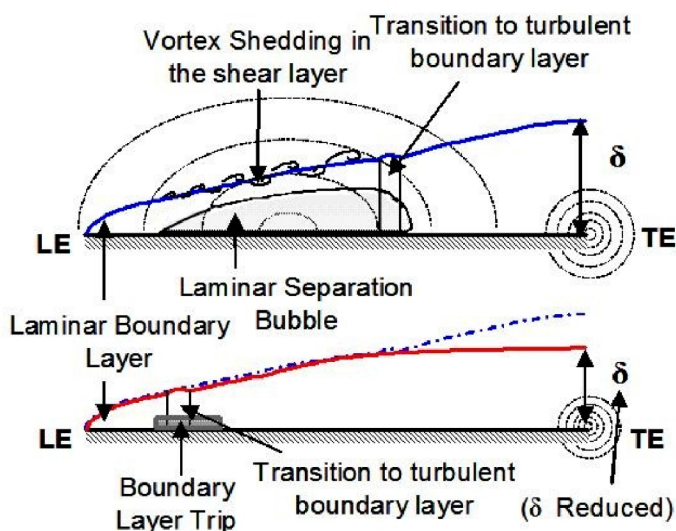
1.9.4. Redukce širokopásmového hluku pomocí turbulátorové pásy

Výzkum zabývající se redukcí širokopásmového hluku u vrtulí pro letouny typu UAV [33] si dal za cíl objasnit mechanismus vzniku širokopásmového hluku a ověřit jednu z možností jak jej snížit. Výzkum vycházel z hypotézy, že turbulátorová páska může přispět ke snížení širokopásmového hluku v cestovním režimu letu bez negativního vlivu na výkonové charakteristiky.

Autoři předpokládali, že odtržení proudu v laminární mezní vrstvě je spojeno s oblastí separace proudění, a nikoliv se vznikem aeroakustické odezvy vznikající na odtokové

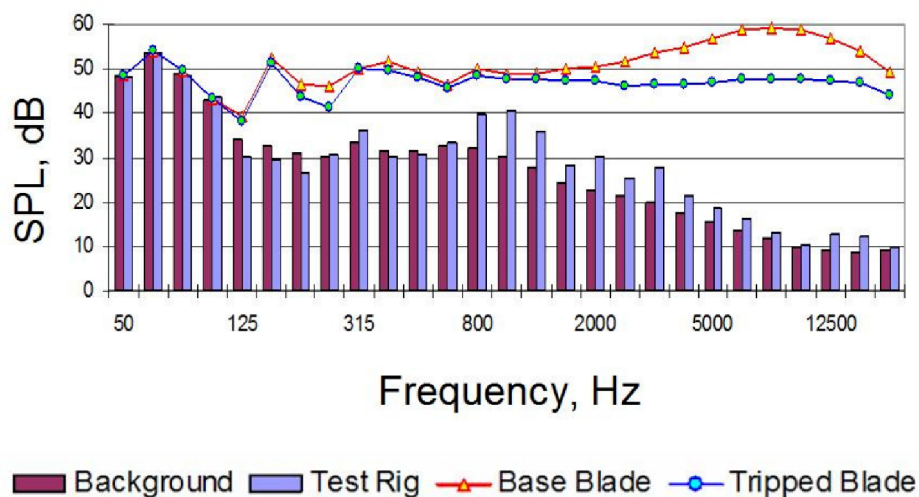
1.9. DOSAVADNÍ POZNATKY O SNIŽOVÁNÍ HLUKU VRTULÍ

hraně, jak je naznačeno na obrázku 1.30. Dle předpokladu autorů je hranice oblasti separace proudění zesilována kmitáním vln mezní vrstvy, které nutí hranici oblasti separace kmitat, čímž vzniká dipólový tonální zdroj zvuku. Tyto tonální zdroje hluku se po celém rozpětí vrtule díky rozdílné rychlosti proudění projevují jako širokospektrální zdroj hluku. [33]



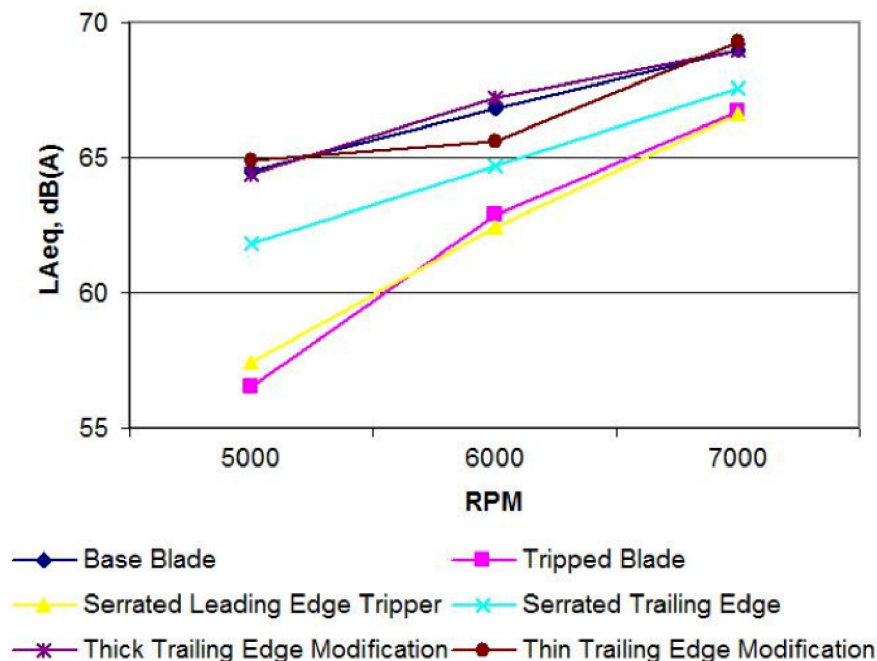
Obrázek 1.30: Vliv turbulátorové pásky na aerodynamické a akustické vlastnosti. [33]

Výsledky toho výzkumu na obrázku 1.31 ukazují, že silnými zdroji hluku jsou laminární a turbulentní mezní vrstvy přítomné na povrchu listu. Výsledky podporují hypotézu, že zdrojem hluku jsou oba mechanismy: jednak hluk od odtrhávání vírů na laminární mezní vrstvě, považován za dominantní, zároveň s hlukem způsobeným turbulentní mezní vrstvou na odtokové hraně. [33]



Obrázek 1.31: Porovnání frekvenčních spekter hluku vrtule s turbulátorovou páskou a bez ní. [33]

Statické testy v anechoické komoře ukazují významné snížení hluku v případě použití turbulátorové pásky o tloušťce srovnatelné s tloušťkou mezní vrstvy. Když byla páska umístěna před bod separace laminárního proudění, došlo ke snížení širokopásmového hluku o 5 až 6 dBA při 3500 ot/min. [33]



Obrázek 1.32: Modifikace nosné plochy při optimální efektivitě vrtule 60 % (úhel náběhu $1,5^\circ$ v místě 80 % relativního rozpětí) a její vliv na hluk vrtule při daných otáčkách. Žlutá křivka označuje použití zoubkovaného turbulátoru, růžová označuje použití jednoduché pásky jako turbulátor. [33]

1.10. Stanovení rozsahu řešení

Stanovení rozsahu řešení je důležité u každého dlouhodobějšího úkolu, protože vždy pracujeme pouze s omezenými zdroji a v určitém časovém omezení. Zadání této diplomové práce navíc poskytuje více směrů, ze kterých lze k optimalizaci vrtule přistupovat.

Návrh nové vrtule, případně zásah do geometrie již existující vrtule byl zamítnut. Samotný návrh nové vrtule by svým rozsahem odpovídal další diplomové práci. Navíc vrtule používané v této diplomové práci jsou vyráběné z vláknových kompozitů. Výroba nových forem by byla finančně a časově náročná.

Od vytvoření optimalizačního softwaru bylo vzhledem k vysoké odborné náročnosti a obtížné validaci také upuštěno.

Zkoumání vzniku separačních bublin na vrtuli, viz kapitola 2.3, ukázalo jejich potenciální výskyt. Vzhledem k jednoduché aplikaci turbulátoru na jakoukoliv vrtuli a ověření jeho smysluplnosti bylo rozhodnuto o směru této práce: studium turbulátoru jako prostředku k optimalizaci vrtule s uvážením hlučnosti.

2. Praktická část

2.1. Popis měření akustických a výkonových veličin

Měření probíhalo ve třech různých lokacích: v neodhlučném prostoru firmy Mejlík Propellers, v anechoické komoře firmy Resideo a v anechoické komoře Fakulty strojního inženýrství na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství (dále ÚADI).

	Resideo	ÚADI
Rozměry (délka x výška x šířka) [m]	5 x 5 x 5	3,55 x 3,6 x 2,76

Tabulka 2.1: Rozměry anechoických komor, ve kterých bylo měření prováděno.

Měření v neodhlučném prostoru používá firma primárně pro měření tahů vrtulí. Prostor je dostatečně velký, aby byl co nejvíce eliminován cirkulující proud v uzavřené místnosti, který by mohl ovlivnit měření charakteristik vrtulí.

Anechoická komora na ÚADI bývá používána převážně pro měření hluku spalovacích motorů.

Anechoická komora v Resideu bývá nejčastěji používána pro měření hluku produktů, které firma vyrábí.



Obrázek 2.1: Ilustrační fotografie anechoické komory na ÚADI (vlevo) a prostoru firmy (vpravo), kde byla měření prováděna.

2.1.1. Zaznamenávané veličiny - akustické

Akustické veličiny jsou měřeny pomocí zařízení Nor-121 Analyser od firmy Norsonic. Měřeny byly následující veličiny:

- intenzita hluku - váhový filtr A,
- frekvenční analýza v třetinooktávovém rozsahu.

2.1.2. Zaznamenávané veličiny - výkonové

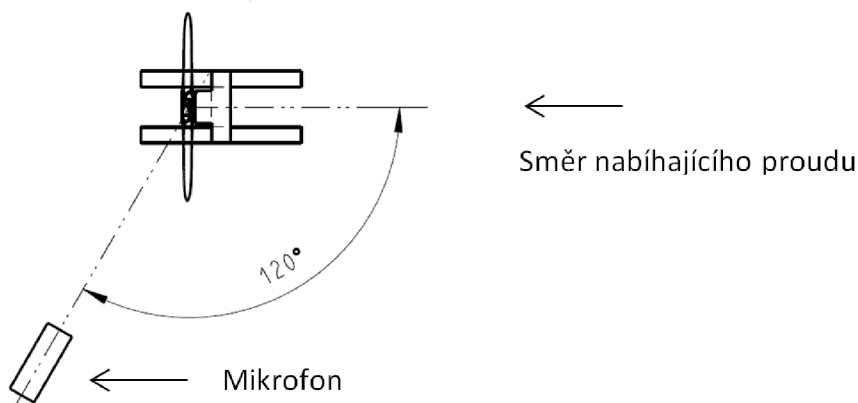
Výkonové charakteristiky vrtule jsou měřeny na měřicím standu RC Benchmark. Měřeny byly tyto veličiny:

- tah vrtule,
- otáčky motoru, respektive vrtule,
- celková účinnost pohonného ústrojí.

2.1.3. Detailní postup měření

Mikrofon byl umístěn ve vzdálenosti 1 metr od středu vrtule v úhlu 120° ke směru nabíhajícímu proudu do místa s nejvyšší očekávanou intenzitou hluku, viz obrázek 2.2.

Nejprve byla vrtule uvedena do potřebného tahu a poté po 10 sekundové pauze, až se tah ustálil na požadovanou hodnotu, byly po dobu 10 sekund měřeny výkonové a akustické charakteristiky vrtule.



Obrázek 2.2: Schéma rozložení měřicího standu s vrtulí a měřicím mikrofonom.

2.2. Vizualizace proudění vzduchu v anechoické komoře

Kromě měření intenzity hluku v anechoických komorách ÚADI a Resideu byla v Resideu provedena vizualizace proudění vzduchu.




Výzkum zabývající se vlivem cirkulace vzduchu v uzavřeném prostoru a jeho vlivem na měření hluku vrtule ukázal značný nárůst harmonických frekvencí, pro některé frekvence až o 15 dB [35].

Vizualizace proudění vzduchu byla provedena pomocí dřevěné hůlky dlouhé cca 50 cm, na které byly navázány provázky dlouhé 10 cm v pravidelných rozestupech, viz obrázek 2.3. Vrtule byla uvedena na požadovaný tah a poté se hůlka posouvala po komoře. V každém místě byl zaznamenán pohyb provázků.



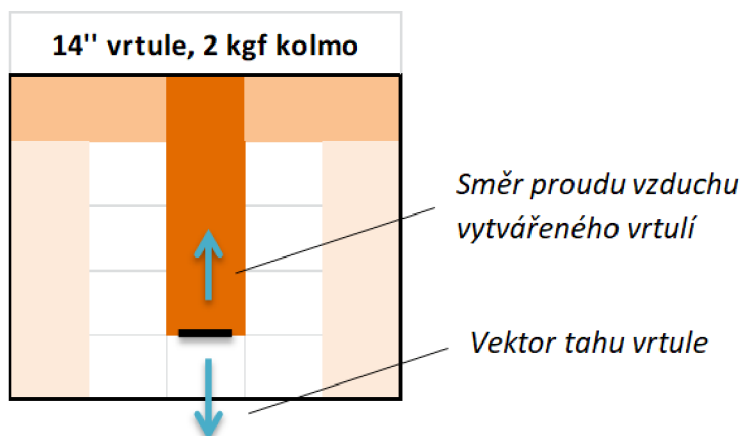
Obrázek 2.3: Fotografie hůlky s navázanými provázky pro vizualizaci cirkulace vzduchu.

Intenzita proudění vzduchu v komoře byla rozdělena do čtyř kategorií, viz tabulka 2.2. Komoře byla pro potřeby tohoto měření rozdělena na čtverce o rozměrech 1x1 m. Do každého ze čtverců byla po dobu 10 sekund postavena hůlka s provázky na stojanu a podle legendy v tabulce 2.2 zaznamenána intenzita proudění vzduchu v daném místě. Hůlka byla ve výšce středu vrtule. Na obrázku 2.4 je příklad vyhodnocení cirkulace vzduchu, tzv. diagram cirkulace s jeho popisem.

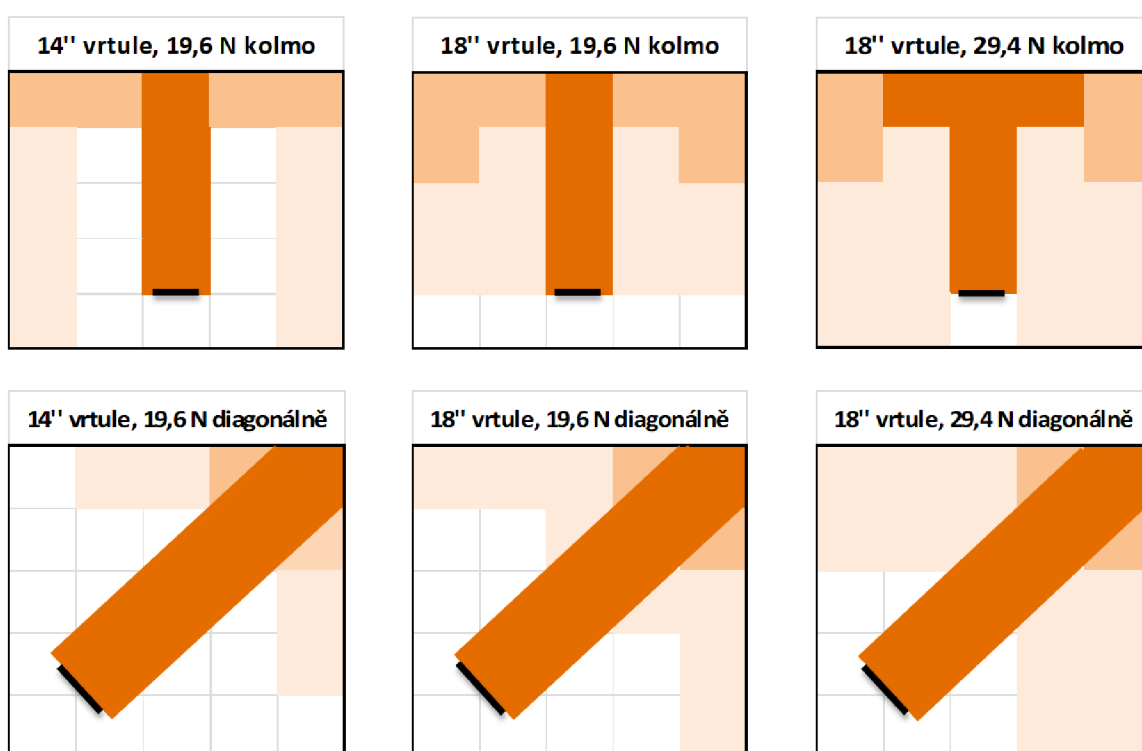
barevné označení	popis	pohyb provázku
	intenzivní proud vzduchu	provázek je vodorovně
	méně intenzivní proud vzduchu	provázek se drží v úhlu cca 45°
	slabý proud vzduchu	provázek se třepetá ve svislé poloze
	klid - vzduch necirkuluje	provázek je v klidu

Tabulka 2.2: Legenda k barevnému označení intenzity cirkulace vzduchu v komoře.

2.2. VIZUALIZACE PROUDĚNÍ VZDUCHU V ANECHOICKÉ KOMOŘE



Obrázek 2.4: Popis diagramu cirkulace vzduchu v anechoické komoře.



Obrázek 2.5: Vizualizace proudění v anechoické komoře Resideo pro 14" a 18" vrtule v kolmém a diagonálním směru.

Z diagramů vizualizace proudění je patrný intenzivní proud vzduchu vznikající hned za vrtulí, který pokračuje až ke stěně komory. Podle velikosti tahu a rozměrů vrtule poté proud se sníženou intenzitou pokračuje podél bočních stěn komory v protisměru původního proudu. Od rohů komory se poté slabý proud vzduchu vrací zpět a postupně zaniká. Tento průběh je stejný pro všechny tahy a rozměry vrtulí testovaných v kolmém směru.

Pro všechny zkoumané vrtule a tahy bylo vizualizací ověřeno, že prostor před vrtulí byl klidný, tedy že vrtule nenasávala rozvířený nebo proudící vzduch.

2.3. OVĚŘENÍ VZNIKU A POLOHY SEPARAČNÍCH BUBLIN

Z porovnání různých průměrů vrtule vyvíjejících stejný tah vychází, že větší vrtule způsobuje obecně větší víření vzduchu v komoře.

Zvyšování tahu má za následek rozšíření intenzivního proudění po trajektorii proudu vzduchu a intenzivnější proudění vzduchu v celé komoře.

Testování vrtulí diagonálně mělo podle vizualizace za následek jednak obecně nižší proudění vzduchu a pak také izolaci prostoru v nejbližším okolí kolem vrtule, tedy i v místě, kde byl umístěn mikrofon pro měření hluku, jak je patrné z obrázku 2.5.

Na základě těchto poznatků probíhalo měření v anechoické komoře na ÚADI pouze v diagonálním směru.

2.3. Ověření vzniku a polohy separačních bublin

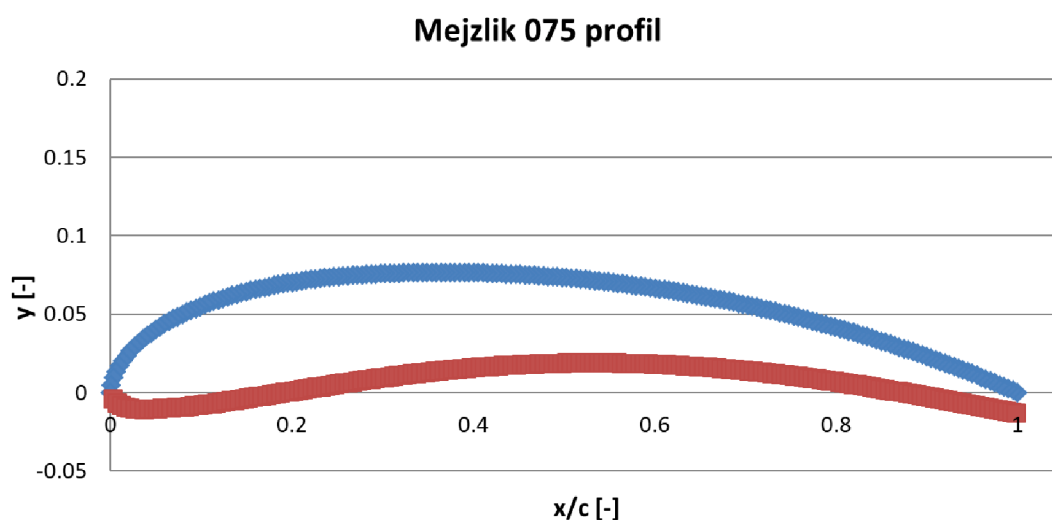
Ověření polohy vzniku separační bubliny je dle předchozích výzkumů nezbytný krok ke správné funkci turbulátorů. [9] [28]

Vznik a případná poloha separační bubliny byly vypočítány pomocí programu XFOIL. Vznik separační bubliny je patrný při výpočtu rozložení tlaku na profilu, jak je naznačeno na obrázku 1.23. V místě odtržení laminárního proudění dochází k narovnání křivky rozložení tlaku; při opětovném přilnutí turbulentního proudění za separační bublinou dojde k výraznému poklesu tlaku. [34]

2.3.1. Výpočet rozložení tlaku

Výpočet rozložení tlaku na profilech vrtule po jejím rozpětí byl realizován v programu XFOIL. Pro výpočet rozložení tlaku po délce profilu je potřeba nejprve určit bezrozměrné Reynoldsovo číslo podle vzorce uvedeného v kapitole 1.7.1.

Na obrázku 2.6 je znázorněna geometrie profilu listu vrtule v místě 75% relativního rozpětí, která byla nahrána do XFOilu pro výpočet rozložení tlaku po délce profilu.



Obrázek 2.6: Profil listu v místě 75% relativního rozpětí s úhlem náběhu $\alpha = 8,45^\circ$.

2.3. OVĚŘENÍ VZNIKU A POLOHY SEPARAČNÍCH BUBLIN

Protože list vrtule vykonává rotační pohyb, není rychlost nabíhajícího proudu vzduchu po rozpětí vrtule konstantní. To samé platí pro délku tětiny a úhel náběhu profilu. Tyto veličiny se po rozpětí vrtule také mění. Tabulka 2.3 obsahuje hodnoty pro celé rozpětí měřené vrtule.

Vrtule měřené v této diplomové práci (o průměru 14 až 18 palců) mají po rozpětí totožné profily, liší se pouze hloubka profilu, která upravená ve stejném měřítku k průměru vrtule. Tento fakt usnadňuje výpočet Reynoldsových čísel po rozpětí vrtule; stačí pouze přepočítat součin rychlosti nabíhajícího proudu vzduchu a hloubky profilu pro jednotlivé vrtule.

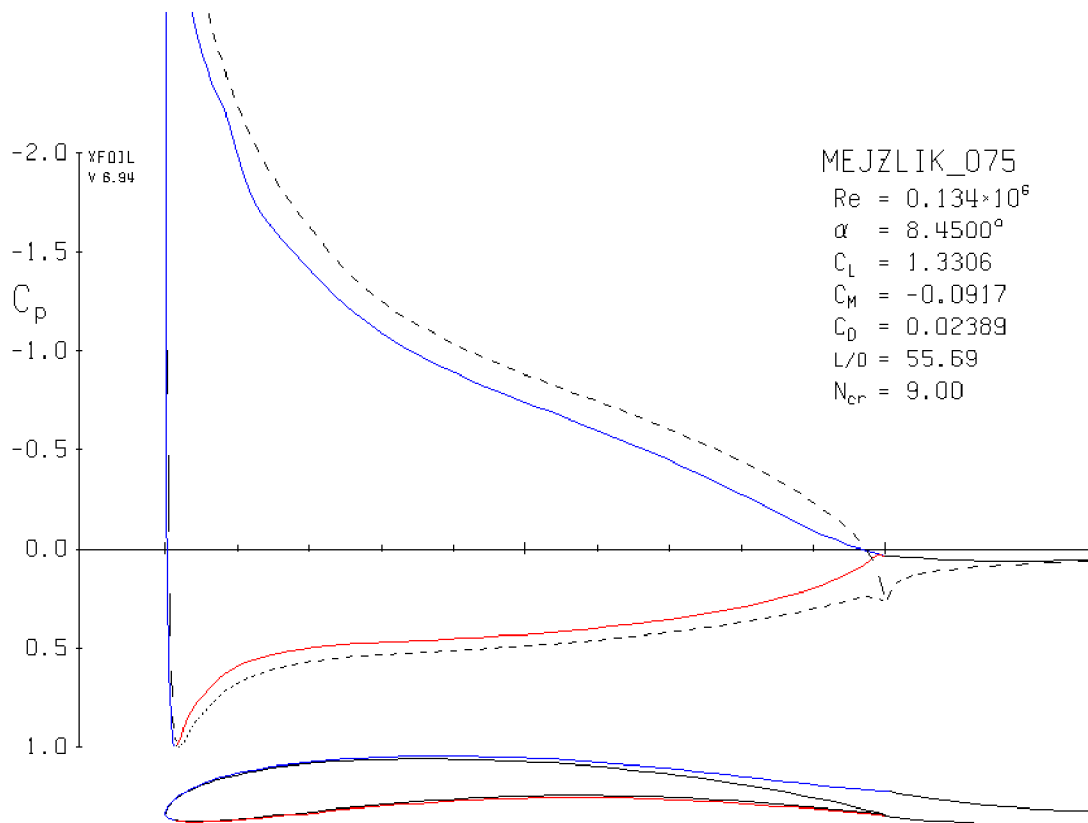
$r/R [-]$	$r [mm]$	$d [mm]$	$V_a [m.s^{-1}]$	$Re [-]$	$\alpha [^\circ]$
0,20	35,56	24,17	25,98	40 000	29,76
0,25	44,45	27,31	32,47	57 000	27,45
0,30	53,34	28,90	38,97	72 000	24,30
0,35	62,23	29,34	45,46	85 000	20,42
0,40	71,12	29,18	51,95	97 000	17,00
0,45	80,01	28,68	58,45	107 000	14,35
0,50	88,90	27,94	64,94	116 000	12,68
0,55	97,79	26,97	71,44	123 000	11,50
0,60	106,68	25,81	77,93	128 000	10,61
0,65	115,57	24,50	84,43	131 000	9,79
0,70	124,46	23,09	90,92	134 000	9,04
0,75	133,35	21,53	97,42	134 000	8,45
0,80	142,24	19,83	103,91	131 000	8,10
0,85	151,13	17,99	110,40	127 000	7,85
0,90	160,02	15,97	116,90	119 000	7,35
0,95	168,91	13,74	123,39	108 000	6,14

Tabulka 2.3: Vypočtené hodnoty Reynoldsova čísla po rozpětí 14" vrtule při tahu 19,6 N. Kde R je poloměr vrtule. $R = 177,8 \text{ mm}$.

2.3. OVĚŘENÍ VZNIKU A POLOHY SEPARAČNÍCH BUBLIN

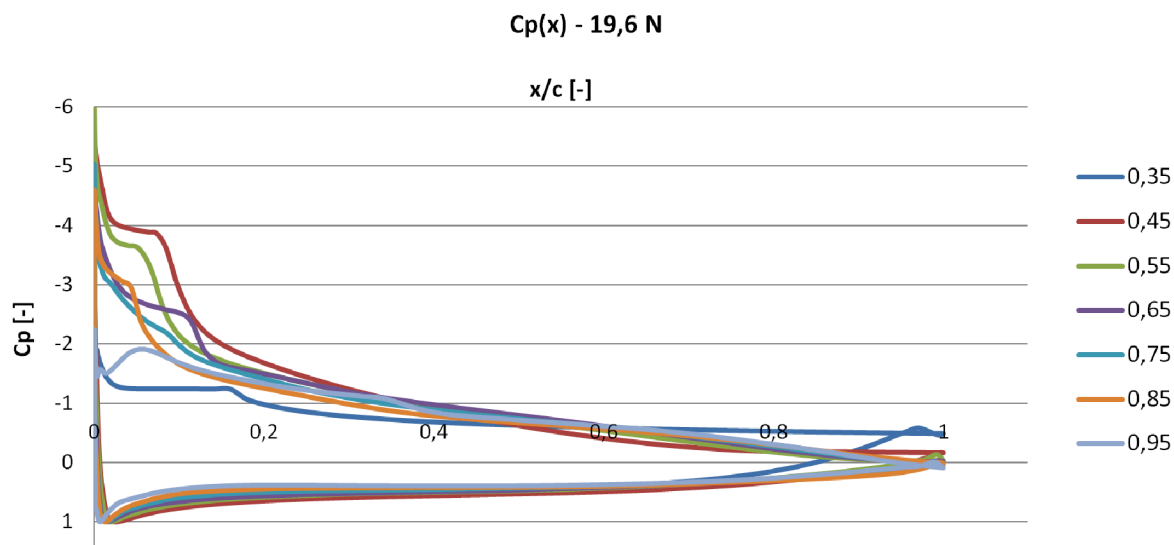
Nejvyšší hodnoty Reynoldsova čísla jsou v místech 70% a 75% relativního rozpětí. Je to z toho důvodu, že tato část listu se na celkovém tahu podílí nejvíce.

Vypočtené hodnoty Reynoldsových čísel a úhly náběhu z tabulky 2.3 byly použity pro výpočet rozložení tlaku na profilu v programu Xfoil. Příklad výpočtu rozložení tlaku je uveden na obrázku 2.7.

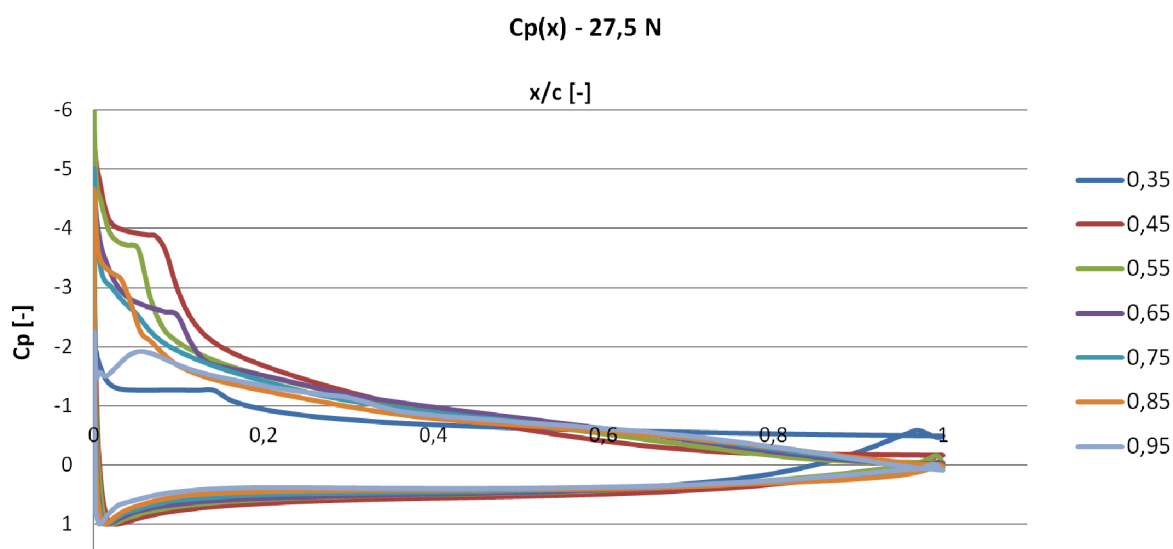


Obrázek 2.7: Příklad výpočtu rozložení tlaku v XFoilu.

2.3. OVĚŘENÍ VZNIKU A POLOHY SEPARAČNÍCH BUBLIN



Obrázek 2.8: Výpočet rozložení tlaku pro tah 19,6 N exportovaný z XFoilu. Jednotlivé křivky odpovídají relativním poloměrům po rozpětí vrtule.



Obrázek 2.9: Výpočet rozložení tlaku pro tah 27,5 N exportovaný z XFoilu. Jednotlivé křivky odpovídají relativním poloměrům po rozpětí vrtule.

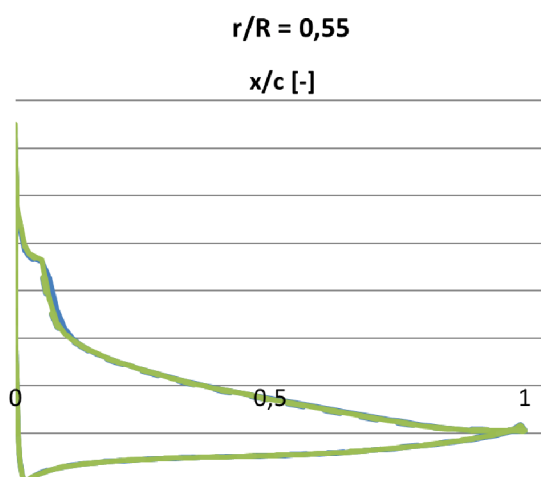
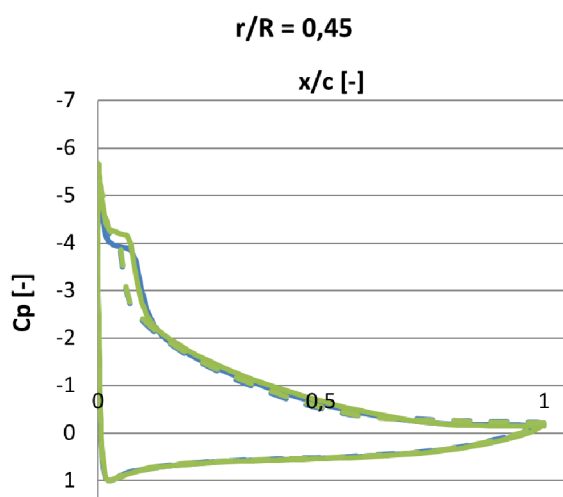
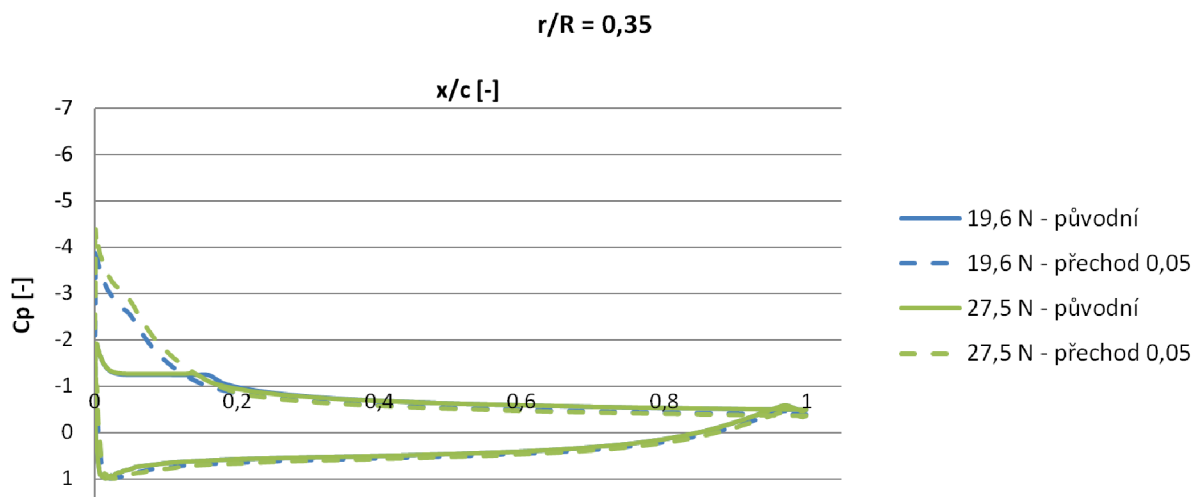
Z obrázků 2.8 a 2.9 je z tvarů křivek rozložení tlaku zřetelný vznik separačních bublin. Křivka rozložení tlaku svým tvarem odpovídá tvaru křivky při přechodovém proudění na obrázku 1.23 z předchozích měření [34].

Se zvyšujícím se Reynoldsovým číslem se oblast přechodového proudění po rozpětí zkracuje a posouvá se blíže náběžné hraně. Separační bubliny se vyskytují v rozmezí 0 až 20 % hloubky profilu.

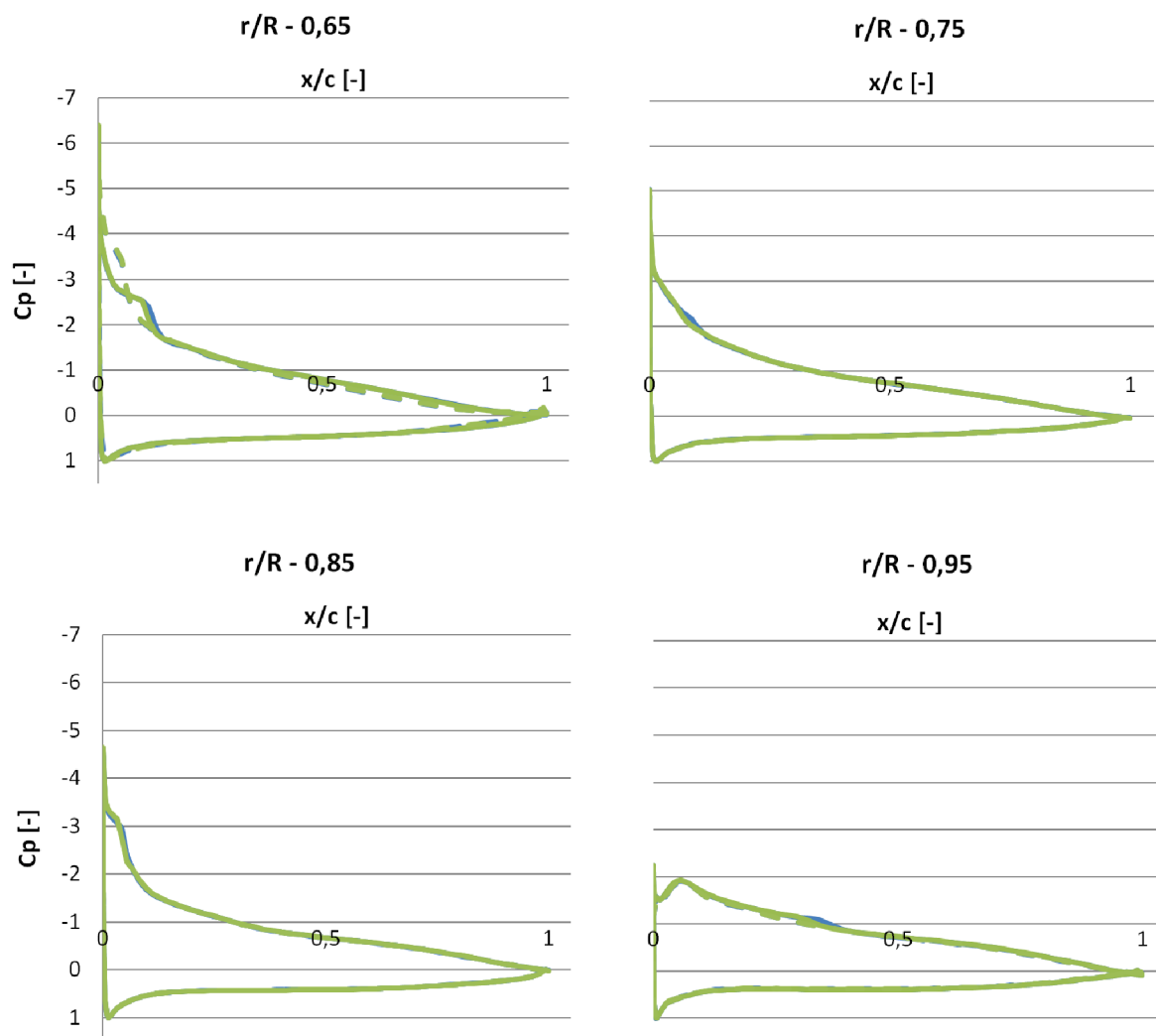
2.3.2. Určení optimální polohy turbulátorové pásky

XFoil umožňuje do svého výpočetního modelu přidat také vynucený přechod proudění z laminárního na turbulentní. Toto a další parametry mezní vrstvy lze ve viskózním módu nastavit pomocí příkazu VPAR. V následném menu lze nastavit místa na horní i spodní straně profilu, ve kterých má k přechodu proudění dojít.

Kvůli malé průměrné hloubce profilu (30,9 mm u 18" vrtule) a místech vzniku separačních bublin na předních částí profilu byla na základě výpočtů v XFoilu vybrána relativní vzdálenost na hloubce profilu 0,05 jako vhodné místo na profilu pro umístění pásky.



2.3. OVĚŘENÍ VZNIKU A POLOHY SEPARAČNÍCH BUBLIN



Obrázek 2.10: Rozložení tlaku na profilu v intervalech po celém rozpětí vrtule. Porovnání profilu původního a s vynuceným přechodem v $x/c = 0,05$ pro tahy 19,6 N a 27,5 N.

Z výpočtů v XFoilu (obrázek 2.10) je patrný rozdílný vliv rozložení tlaku po profilu na místě vynuceného přechodu proudu po rozpětí vrtule. V místech x/c 0,35 až 0,65 dochází k posunu separační bubliny dopředu a k jejímu zmenšení. V místech x/c 0,75 až 0,95 se vliv minimalizuje.

2.3. OVĚŘENÍ VZNIKU A POLOHY SEPARAČNÍCH BUBLIN

r/R [-]	d_{17} [mm]	$d_{t,17}$ [mm]	d_{18} [mm]	$d_{t,18}$ [mm]
0,20	29,35	1,47	31,08	1,55
0,25	33,16	1,66	35,11	1,76
0,30	35,09	1,75	37,16	1,86
0,35	35,63	1,78	37,72	1,89
0,40	35,46	1,77	37,52	1,88
0,45	34,84	1,74	36,87	1,84
0,50	33,93	1,70	35,92	1,80
0,55	32,75	1,64	34,68	1,73
0,60	31,34	1,57	33,18	1,66
0,65	29,75	1,49	31,50	1,58
0,70	28,04	1,40	29,69	1,48
0,75	26,14	1,31	27,68	1,38
0,80	24,08	1,20	25,50	1,27
0,85	21,85	1,09	23,13	1,16
0,90	19,39	0,97	20,53	1,03
0,95	16,68	0,83	17,67	0,88

Tabulka 2.4: Umístění turbulátorové pásky po rozpětí vrtulí. Veličiny d_{17} a d_{18} charakterizují délku třetiv 17" a 18" vrtule a $d_{t,17}$ a $d_{t,18}$ značí vzdálenost odtokové hrany turbulátorové pásky od náběžné hrany vrtulí.

V tabulce 2.4 je uvedeno umístění turbulátorové pásky pro 17" a 18" vrtule.

2.3. OVĚŘENÍ VZNIKU A POLOHY SEPARAČNÍCH BUBLIN

r/R	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95
c_L/c_D pro 19,6 N	4,41	20,94	31,79	46,41	55,70	47,84	60,49
c_L/c_D pro 19,6 N - vynucený přechod	6,58	21,14	32,84	48,28	53,70	47,84	48,78
% zlepšení oproti čisté	49,33 %	0,97 %	3,28 %	4,04 %	-3,58 %	-0,01 %	-19,36 %
c_L/c_D pro 27,5 N	4,46	23,86	34,37	49,44	56,71	49,52	62,92
c_L/c_D pro 27,5 N - vynucený přechod	7,37	22,99	34,40	51,07	56,71	49,50	51,51
% zlepšení oproti čisté	65,08 %	-3,66 %	0,09 %	3,31 %	0,01 %	-0,04 %	-18,13 %

Tabulka 2.5: Porovnání klouzavostí (poměru c_L/c_D) profilů listu vrtule po jejím rozpětí s použitím vynuceného přechodu proudění (simulace turbulátoru) a bez něj. Záporná procentuální hodnota značí zhoršení klouzavosti oproti neupravenému listu.

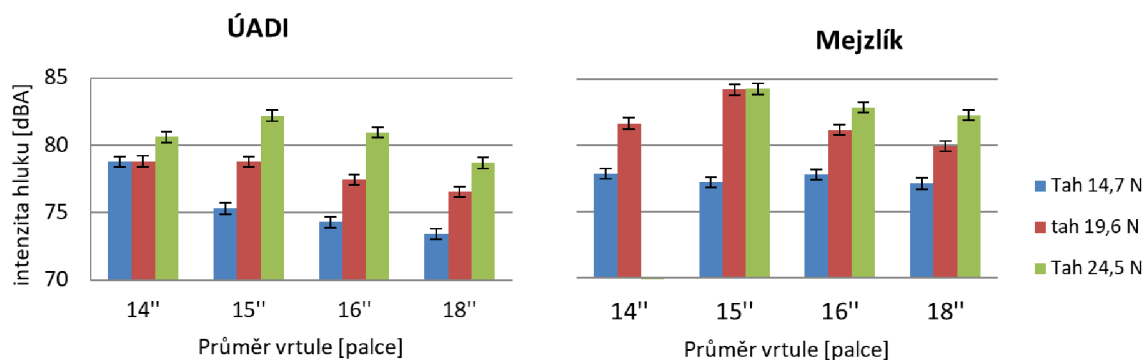
Tabulka 2.5 obsahuje porovnání klouzavosti jednotlivých profilů s vynuceným přechodem proudění po rozpětí podle výpočtu z XFOILu a bez něj. K významnému zvýšení klouzavosti došlo v r/R 0,35, tato část vrtule ovšem k celkovému tahu přispívá malým podílem. Pro obě hodnoty tahu dochází k výraznému snížení klouzavosti na konci listu a to téměř o 20 %.

U relativního poměru 0,75, který je pro výsledné charakteristiky vrtule určující, je předpokládané snížení klouzavosti při tahu 19,6 N 3,58 %. Pro tahu 27,5 N je hodnota oproti neupravenému listu téměř totožná. Na základě těchto zjištění bylo rozhodnuto vyzkoušet dvě varianty turbulátorových pásek: jednu po celé délce listu a druhou pouze do relativního rozpětí 0,7, aby se zamezilo případnému snížení účinnosti konce listu.

3. Výsledky a diskuze

3.1. Srovnání hluku v neodhlučném a odhlučném prostoru

Níže jsou uvedené závislosti intenzity hluku pro různé tahy a různé rozměry vrtulí.

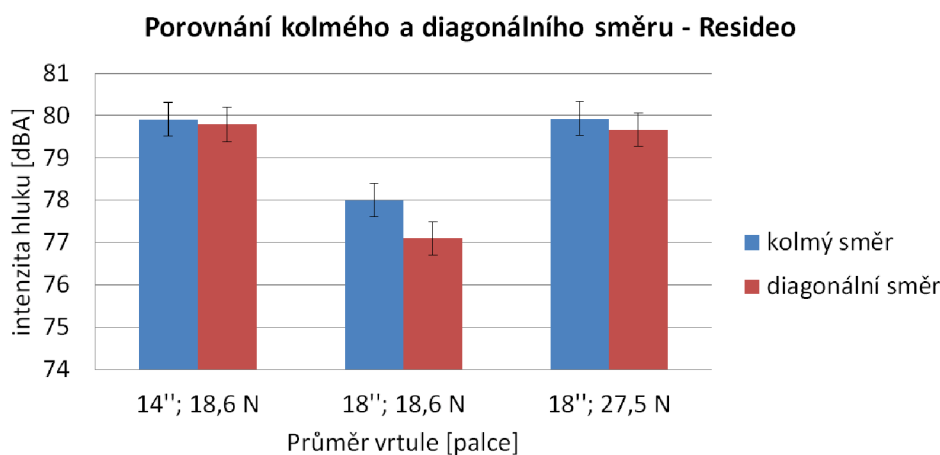


Obrázek 3.1: Závislost hladiny intenzity hluku na průměru použité vrtule pro vybrané tahy. Měření v anechoické komoře (vlevo) a ve firmě Mejlík (vpravo).

Z výsledků měření na ÚADI na obrázku 3.1 je patrný všeobecný trend snižování hladiny hluku při použití vrtulí o větším průměru. Tyto výsledky potvrzují tvrzení předchozích zdrojů [11]. U výsledků měření ve firmě Mejlík v neodhlučném prostoru je tento trend méně patrný.

3.2. Srovnání hluku v kolmém a diagonálním směru

Kromě vizualizace proudění byl porovnán také hluk vrtulí v kolmém a diagonálním směru.

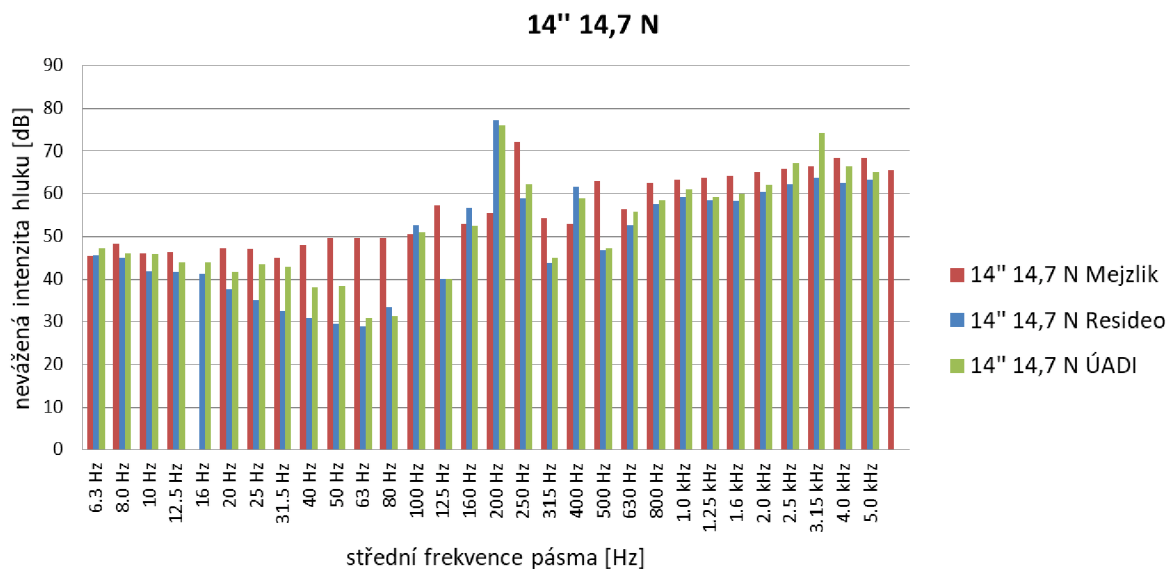


Obrázek 3.2: Srovnání intenzity hluku v kolmém a diagonálním směru v anechoické komoře Resideo.

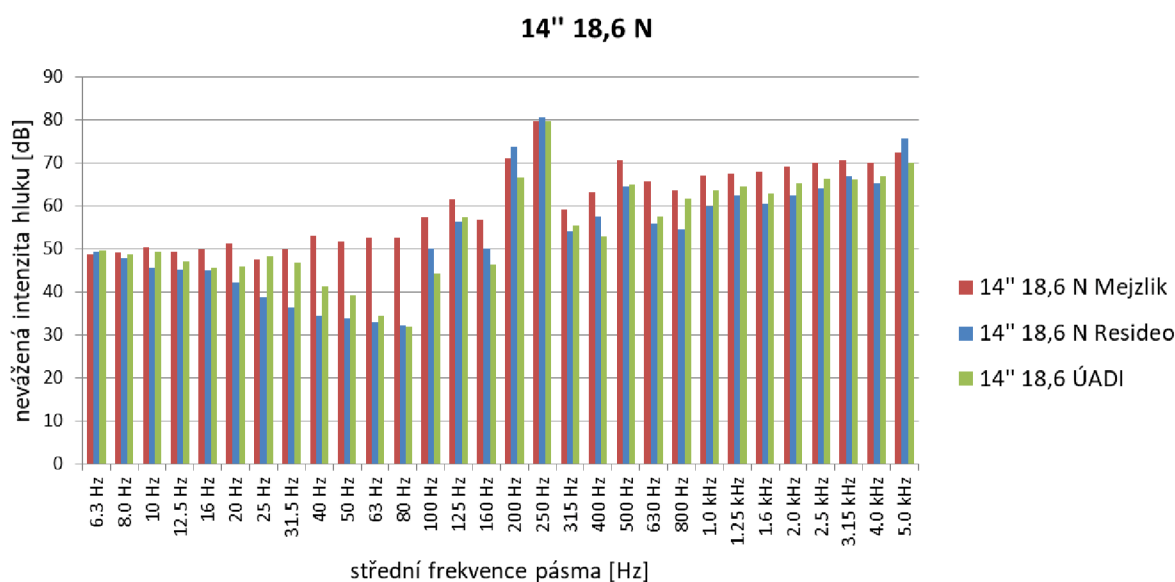
Z výsledků na obrázku 3.2 je patrný trend mírného snižování hluku v diagonálním směru. Kvůli odchylkám měřicího přístroje toto ovšem nelze brát za prokázané.

3.3. Frekvenční charakteristika

Frekvenční charakteristika byla také měřena zařízením Nor-121 Analyser od firmy Norsonic. Cílem tohoto měření bylo získat kmitočtové spektrum, které nám poskytne více informací o jednotlivých zdrojích hluku generovaného vrtulí.



Obrázek 3.3: Frekvenční spektrum 14" vrtule pro tah 14,7 N a otáčky: 5984 ot/min - firma Mejlík; 6072 ot/min - Resideo a 6286 ot/min - ÚADI.



Obrázek 3.4: Frekvenční spektrum 14" vrtule pro tah 18,6 N a otáčky: 6976 ot/min - firma Mejlík; 6904 ot/min - Resideo a 7170 ot/min - ÚADI.

3.3. FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA

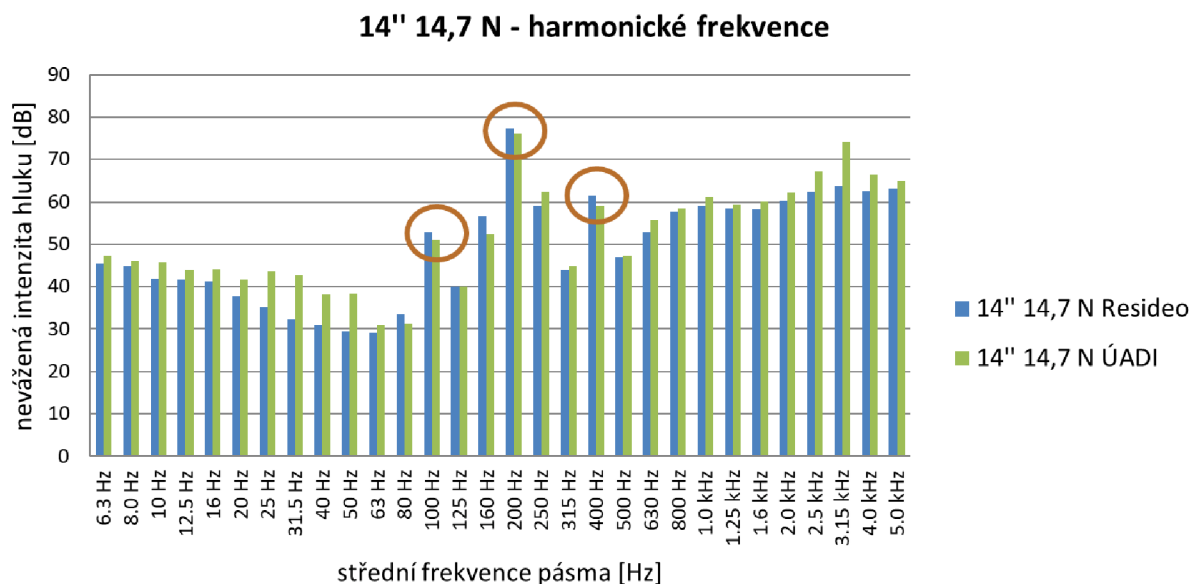
V obou grafech (3.3, 3.4) se vyskytuje výrazná špička kolem frekvencí 200 Hz a 250 Hz. Jednoduchým výpočtem lze ověřit, že se jedná o frekvenci procházejících listů vrtule:

$$f = 2 \frac{n}{60} = 2 \frac{5984}{60} = 199 \text{ Hz}$$

kde n jsou otáčky vrtule v otáčkách za minutu a f je výsledná frekvence listů procházejících jedním místem. Koeficient 2 před zlomkem značí počet listů, jedno otočení vrtule odpovídá průchodu dvou listů jedním místem.

Obdobně můžeme ověřit i špičku pro tah 18,6 N. Zde vychází frekvence procházejících listů 233 Hz. Tyto výsledky potvrzují předchozí výzkumy v tvrzení, že hlavním zdrojem hluku u vrtulí je hluk od tahu vrtule. Jedná se o tzv. 1. harmonickou frekvenci.

Dále jsou v grafech patrné některé vyšší a nižší harmonické frekvence, viz obrázek 3.5. Kromě nejvýraznější 1. harmonické frekvence, která již byla zmíněna, je dále patrná výrazná frekvence 100 Hz; jedná se o frekvenci průchodu jednoho listu. Výrazná je také frekvence 400 Hz, tedy násobek 1. harmonické frekvence nazývaní se 2. harmonická frekvence.



Obrázek 3.5: Frekvenční spektrum s vyznačenými harmonickými frekvencemi.

Z obrázků 3.3 a 3.4 vyplývá, že měření ve firmě v neodhlučněném prostoru má za následek zvýšení hlučnosti v celém frekvenčním spektru. Nejvýrazněji ovšem v intervalu frekvencí od 20 Hz do 100 Hz. Při porovnání jednotlivých anechoických komor z obrázku 3.5 jsou poté patrné výrazně menší rozdíly v jednotlivých intenzitách hluku, nejvýraznější v intervalu 20 Hz až 50 Hz.

3.4. Měření vrtulí s turbulátory

V této kapitole jsou uvedené výsledky měření vrtulí s turbulátorovými páskami.

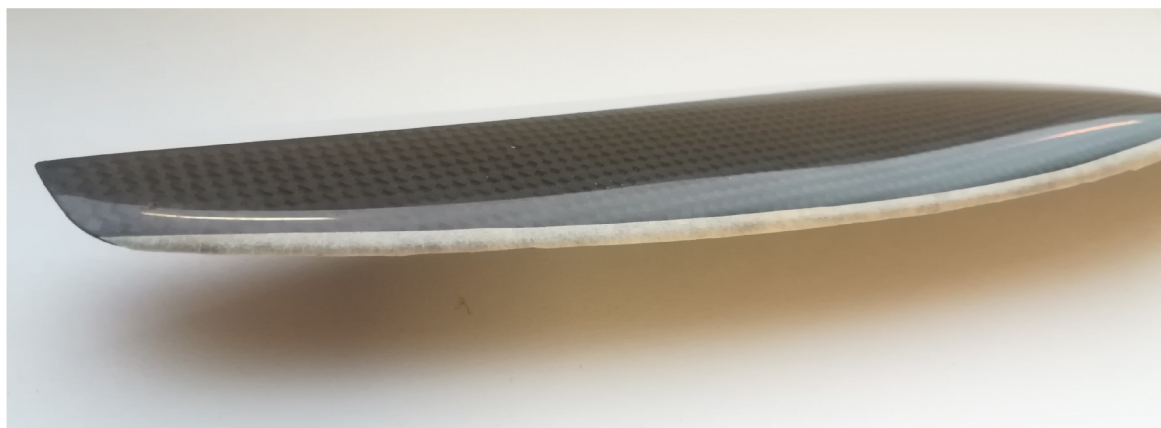
Na základě předchozího výzkumu [25] byly zvoleny dva druhy pásek: papírová páska (tloušťka $120\ \mu\text{m}$) a běžná průhledná páska (tloušťka $45\ \mu\text{m}$).

Turbulátorové pásky byly na vrtuli umístěny ručně. Pomocí posuvného měřidla bylo odměřeno správné umístění pásky v každém místě listu vrtule. Rozměry a umístění turbulátorových pásek pro obě testované vrtule jsou uvedeny v tabulce 2.4. Páska byla zastřižena tak, aby její náběžná hrana ležela na náběžné hraně vrtule, viz obrázky 3.6 a 3.7.

Před měřením bylo na vyvažovacím standu ověřeno, že jsou vrtule s turbulátorovou páskou vyvážené.



Obrázek 3.6: 17" vrtule s nalepenou izolepou sloužící jako turbulátor.

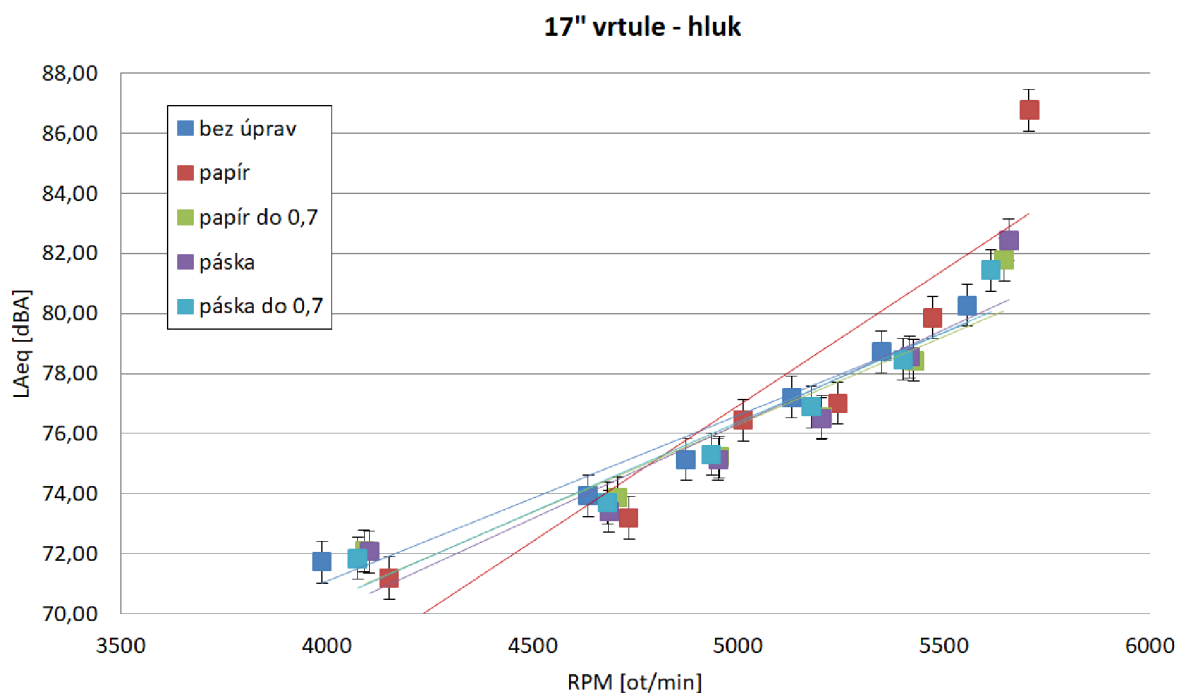


Obrázek 3.7: 17" vrtule s nalepenou papírovou páskou sloužící jako turbulátor.

Vrtule s turbulátorem byla poté měřena na testovacím standu v anechoické komoře na ÚADI. Byl měřen tah vrtule v závislosti na otáčkách a hluku v rozsahu 14,7 až 30 N. Celkově bylo měřeno 5 variant úpravy listů vrtule: bez úpravy, průhledná páska po celém rozpětí, průhledná páska pouze do relativního rozpětí 0,7, papírová páska po celém rozpětí a papírová páska do relativního rozpětí 0,7.

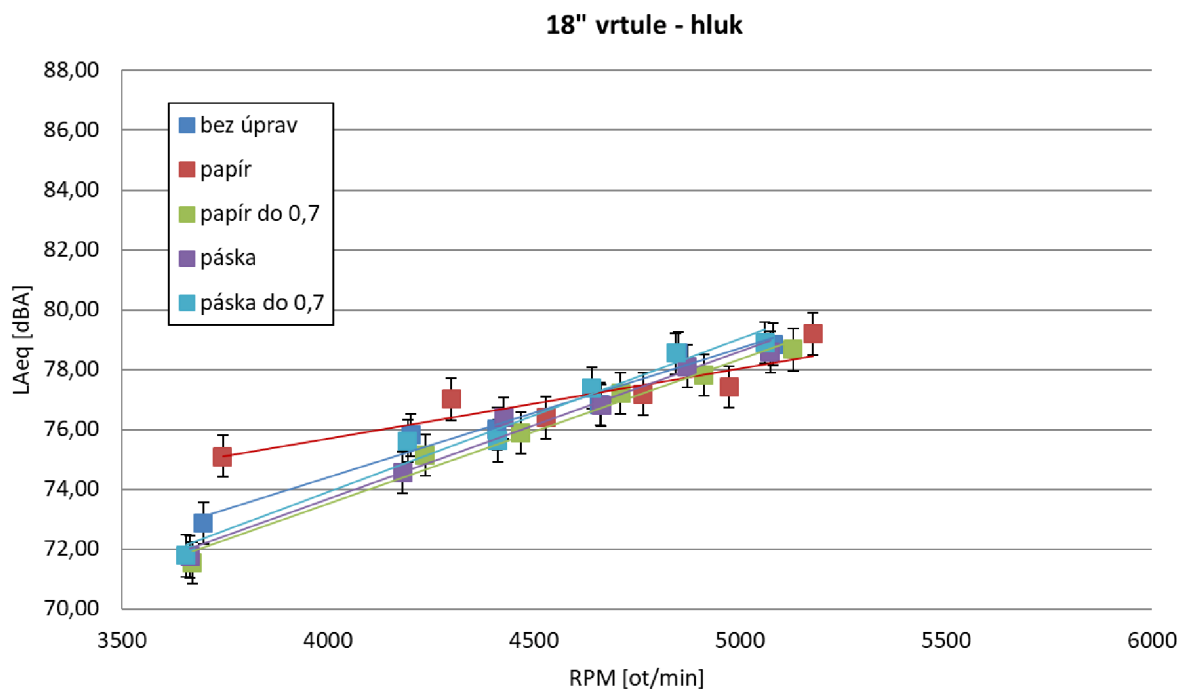
3.4.1. Hluk vrtulí s úpravami nosné plochy

Kromě výkonových charakteristik byla měřena také akustická hladina hluku vrtulí s úpravami nosných ploch.



Obrázek 3.8: Srovnání ekvivalentních hladin hluku 17" vrtule s různými úpravami nosných ploch.

Použitá papírová páska měla za následek výrazné zvýšení ekvivalentní hladiny hluku při nejvyšších otáčkách a to až o 5 dB oproti ostatním turbulátorům. Naopak pro nejnižší otáčky lze pozorovat trend snižování hluku, výsledky jsou ovšem v mezích odchylek ostatních turbulátorů, viz obrázek 3.8.



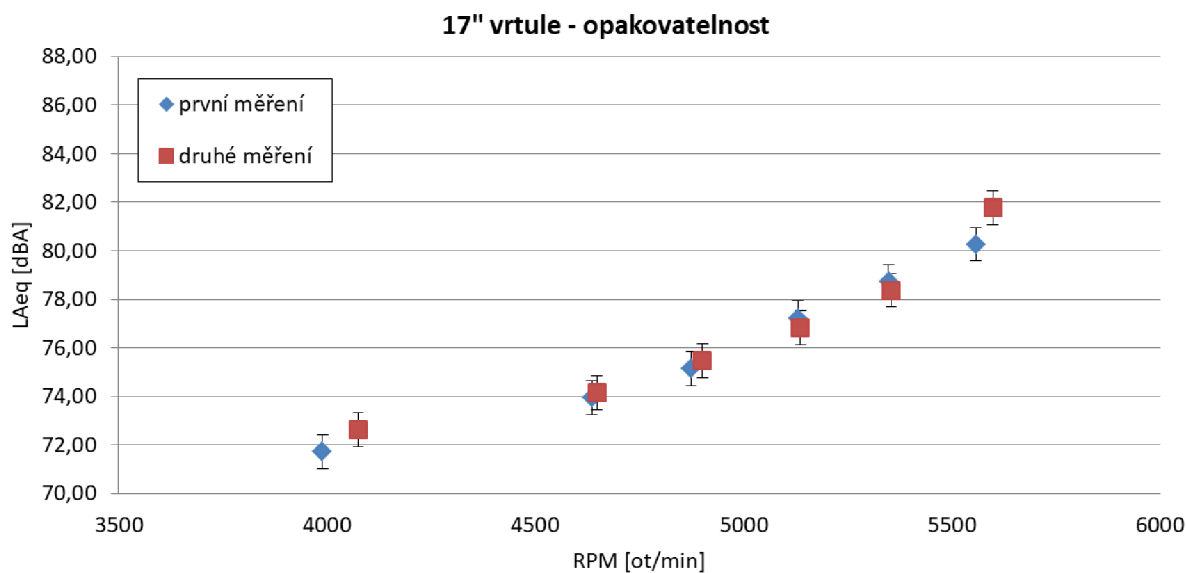
Obrázek 3.9: Srovnání ekvivalentních hladin hluku 18" vrtule s různými úpravami nosných ploch.

Hodnoty ekvivalentních hladin hluku 18" vrtule, viz obrázek 3.9, zůstávají pro většinu úprav v rámci odchylky měření. U nižších otáček dochází ke zvýšení hladiny hluku při použití papírové pásky jako turbulátoru. U vyšších otáček dochází ke srovnání tohoto trendu s ostatními druhy úprav.

Toto měření nepotvrdilo výsledky předchozích studií [33], viz obrázek 1.32.

3.4.2. Ověření opakovatelnosti měření

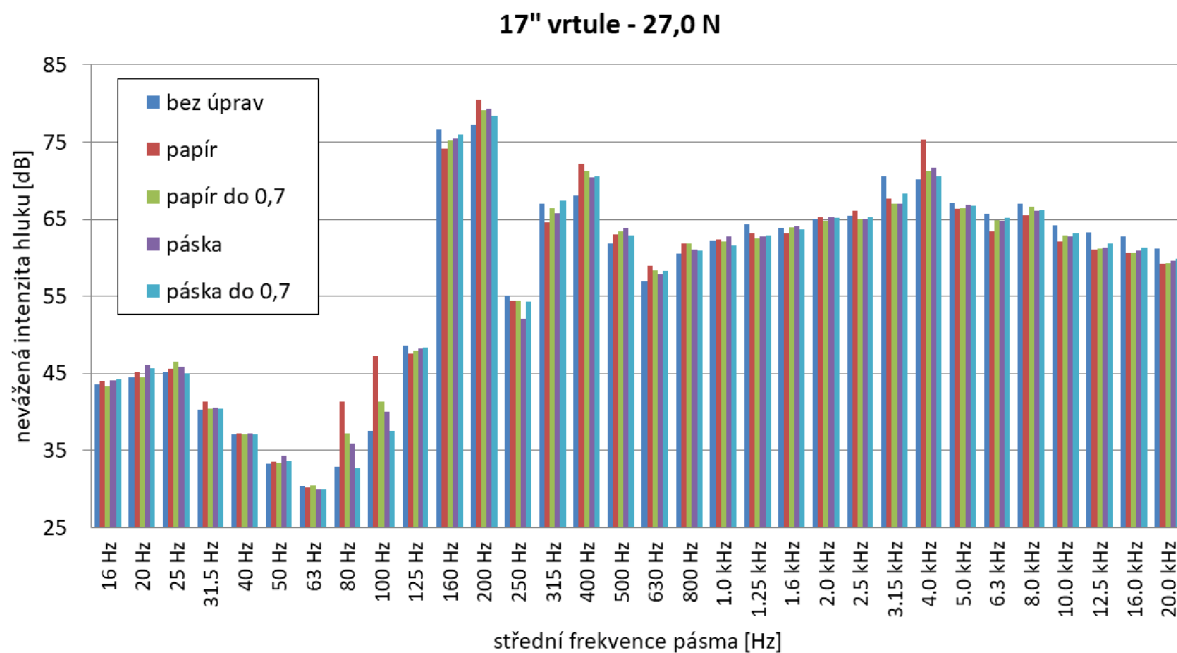
Vzhledem ke specifikům měření hluku, na které má vliv celá řada faktorů, například proudění vzduchu v komoře, vibrace vrtule a standu, hluk externího prostředí a další, byla 17" vrtule měřena opakovaně s časovým rozestupem. Výsledky na obrázku 3.10 ukazují, že rozptyl hodnot pro stejné tahy může být až 1,5 dBA. Kromě jediné hodnoty je chyba v opakovatelnosti měření v intervalu $\pm 0,7$ dBA, což je maximální přípustná odchylka definovaná výrobcem zařízení.



Obrázek 3.10: Opakované měření 17" vrtule bez úprav s časovým rozestupem čtyř hodin.

3.4.3. Frekvenční spektrum vrtulí s úpravami nosné plochy

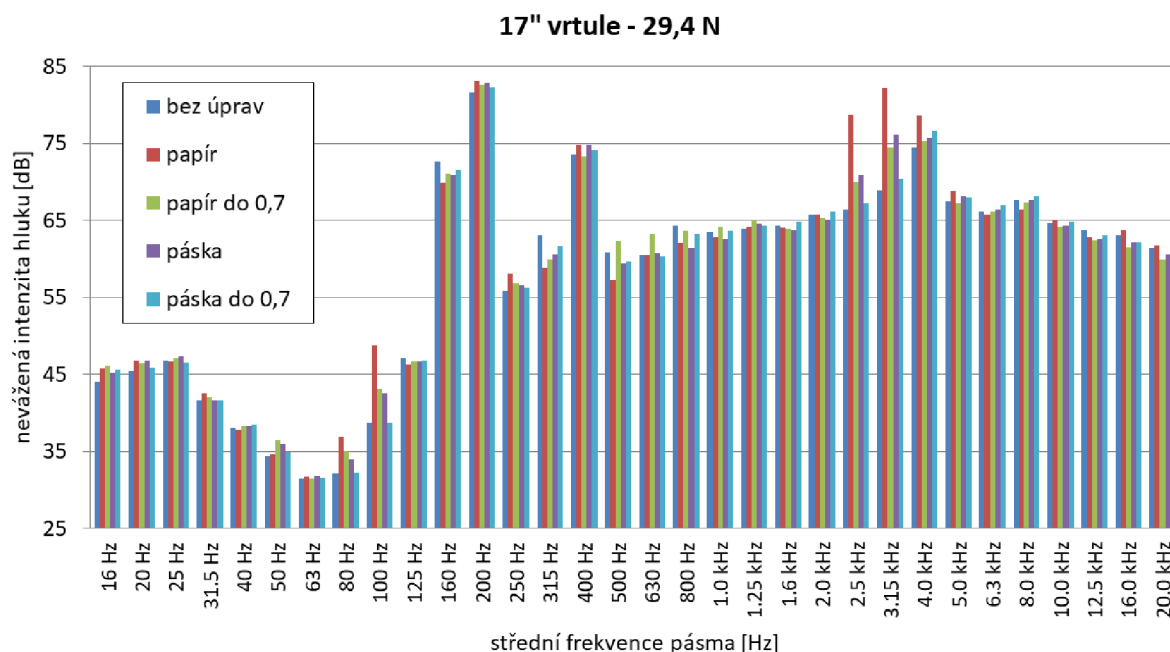
Níže jsou uvedené výsledky vybraných měření frekvenčních spekter vrtulí.



Obrázek 3.11: Frekvenční spektra 17" vrtule s úpravami listů. Tah 27,0 N.

Z obrázku 3.11 je patrné zvýšení intenzity hluku pro papírovou pásku po celé délce listu při frekvenci 4 kHz. Zvýšení intenzity nastává také pro frekvence 80 Hz a 100 Hz, jak je ale uvedeno v tabulce 1.2, tyto frekvence se na celkové lidským uchem slyšitelné intenzitě podílí minimálně.

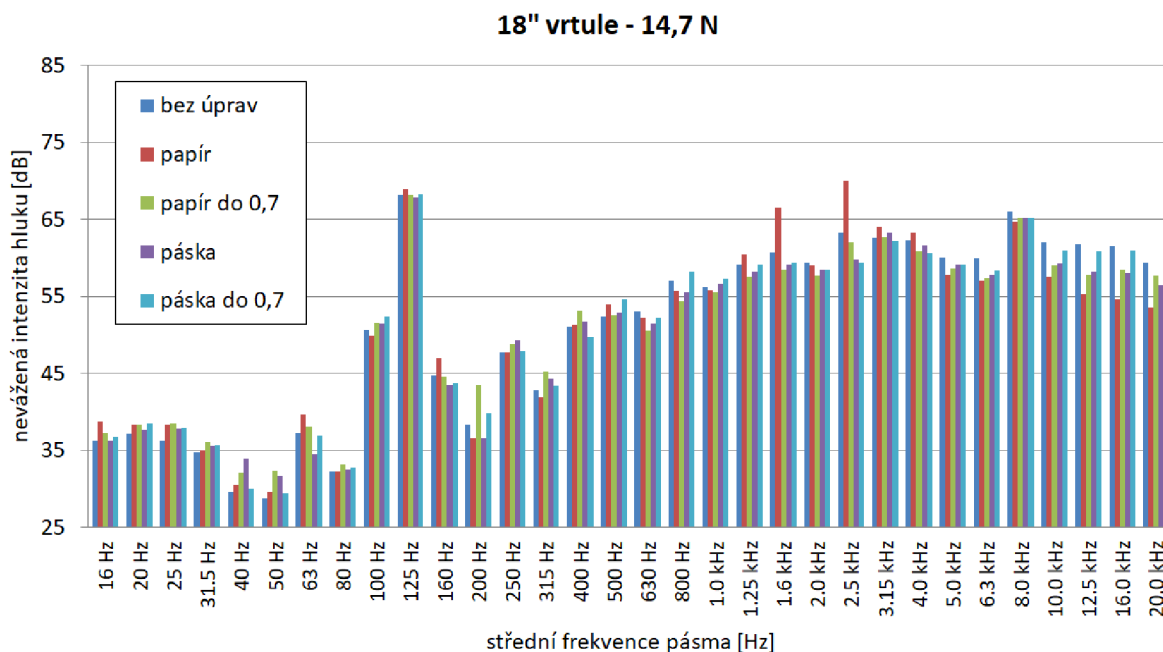
Kromě výše zmíněných frekvencí zůstávají intenzity hluku pro daný tah shodné s neupravenou vrtulí.



Obrázek 3.12: Frekvenční spektra 17" vrtule s úpravami listů. Tah 29,4 N.

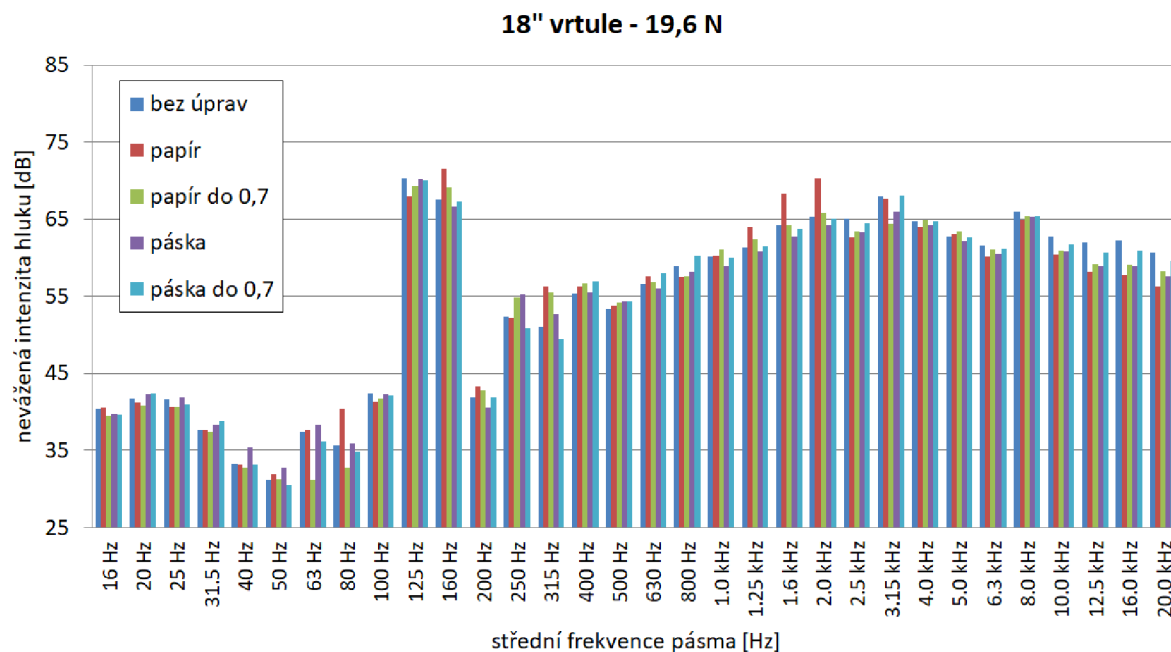
Obrázek 3.12 ukazuje, že zvýšení tahu na 29,4 N mělo za následek zvýšení intenzity hluku ostatních úprav vrtulí pro frekvenci 4 kHz. Papírová páska ovšem oproti tahu 27,0 N zvýšila intenzitu hluku u frekvencí 2,5 kHz a 3,15 kHz. U těchto frekvencí dochází k velkému rozptylu intenzit hluku pro všechny druhy úprav vrtulí.

Zvýšení intenzit hluku při použití papírové pásky má za následek zvýšení celkové hladiny hluku.



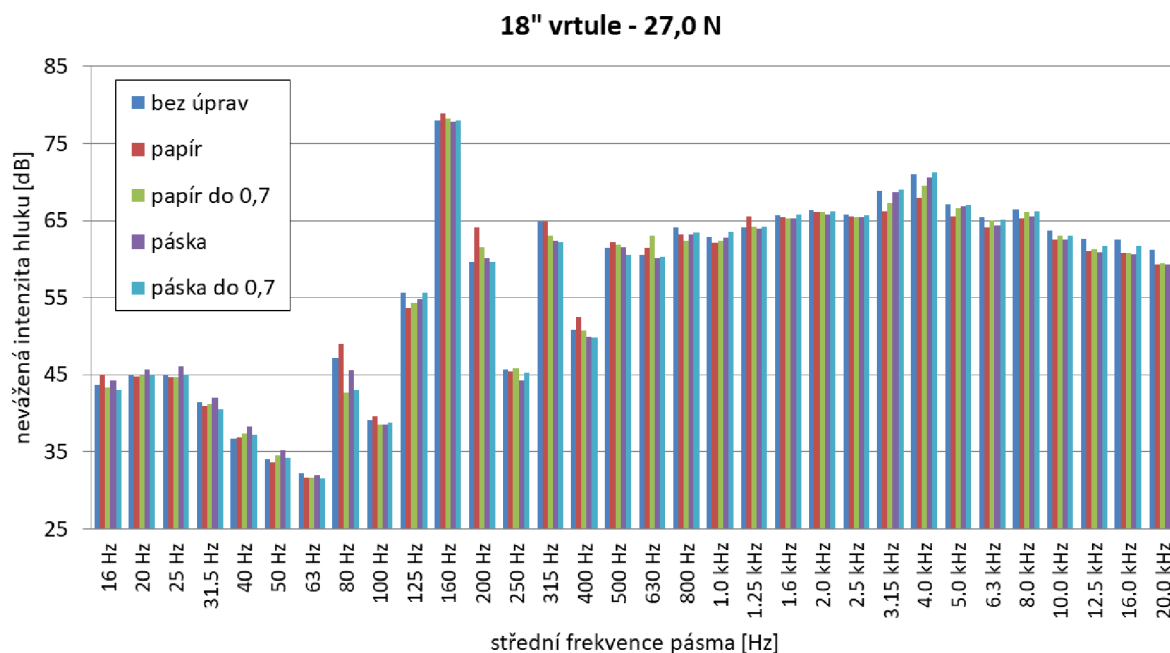
Obrázek 3.13: Frekvenční spektra 18" vrtule s úpravami listů. Tah 14,7 N.

Při použití 18" vrtule (obrázek 3.13) je při nízkých otáčkách opět výrazný nárůst intenzity hluku u papírové pásky a to u frekvencí 1,6 kHz a 2,5 kHz. Naopak tomu je u frekvencí 10 kHz až 20 kHz, kde u papírové pásky dochází ke snížení intenzity hluku oproti ostatním úpravám vrtule.

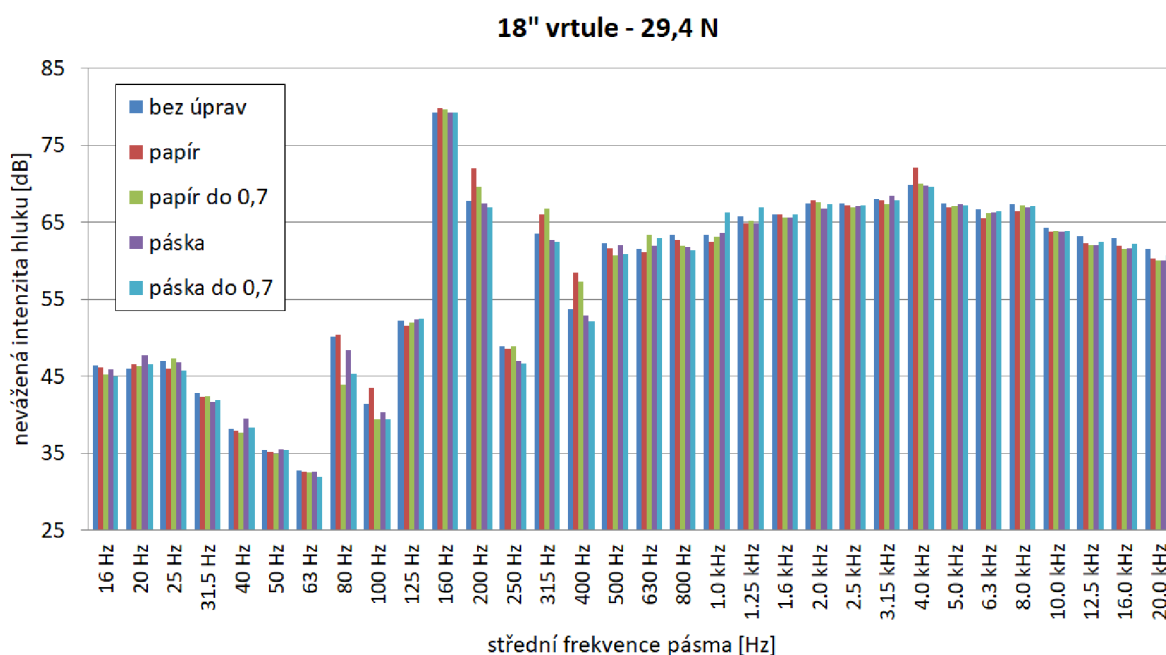


Obrázek 3.14: Frekvenční spektra 18" vrtule s úpravami listů. Tah 19,6 N.

Zvýšení tahu na 19,6 N (obrázek 3.14) má za následek snížení rozdílů z obrázku 3.13, třebaže jsou stále patrné.



Obrázek 3.15: Frekvenční spektra 18" vrtule s úpravami listů. Tah 27,0 N.



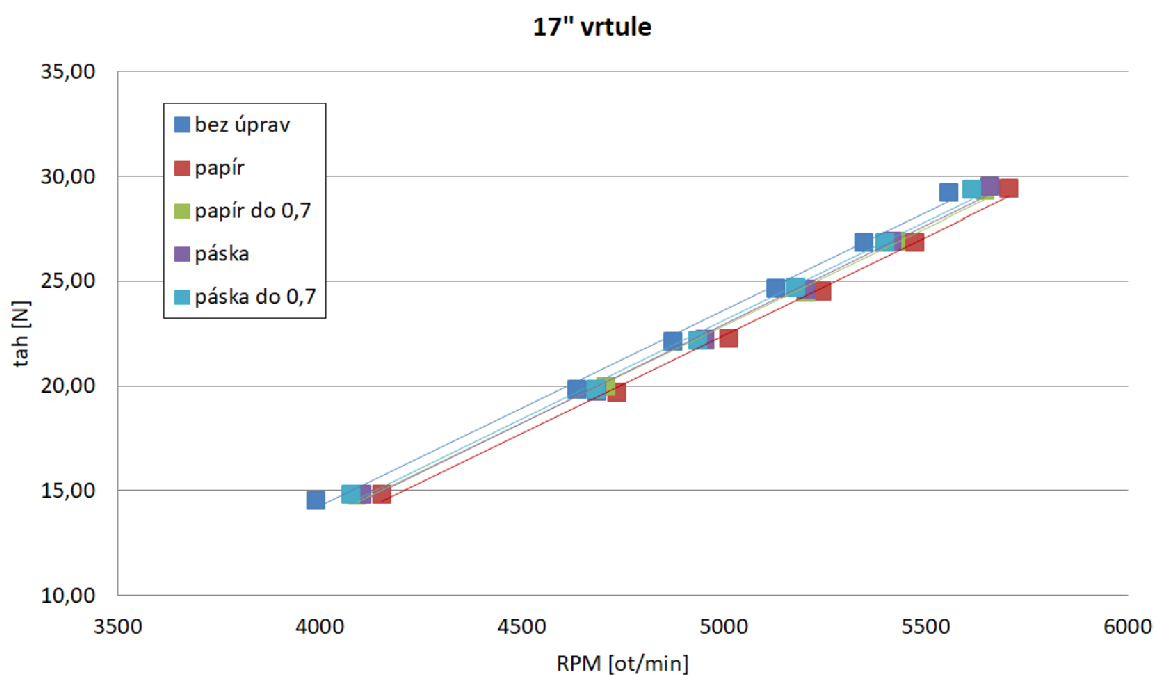
Obrázek 3.16: Frekvenční spektra 18" vrtule s úpravami listů. Tah 29,4 N.

Porovnání vlivu turbulátorů při stejných tazích pro 17" (obrázky 3.11 a 3.12) a 18" vrtule (obrázky 3.15 a 3.16) ukazuje podobný trend pro většinu úprav vrtule, kdy frekvence s nejvyšší intenzitou jsou 3,15 kHz a 4,0 kHz. Intenzity pro papírovou pásku se ovšem výrazně liší; u 17" vrtule byly u těchto frekvencí výrazně vyšší, u 18" vrtule mají srovnatelné hodnoty s ostatními úpravami vrtule.

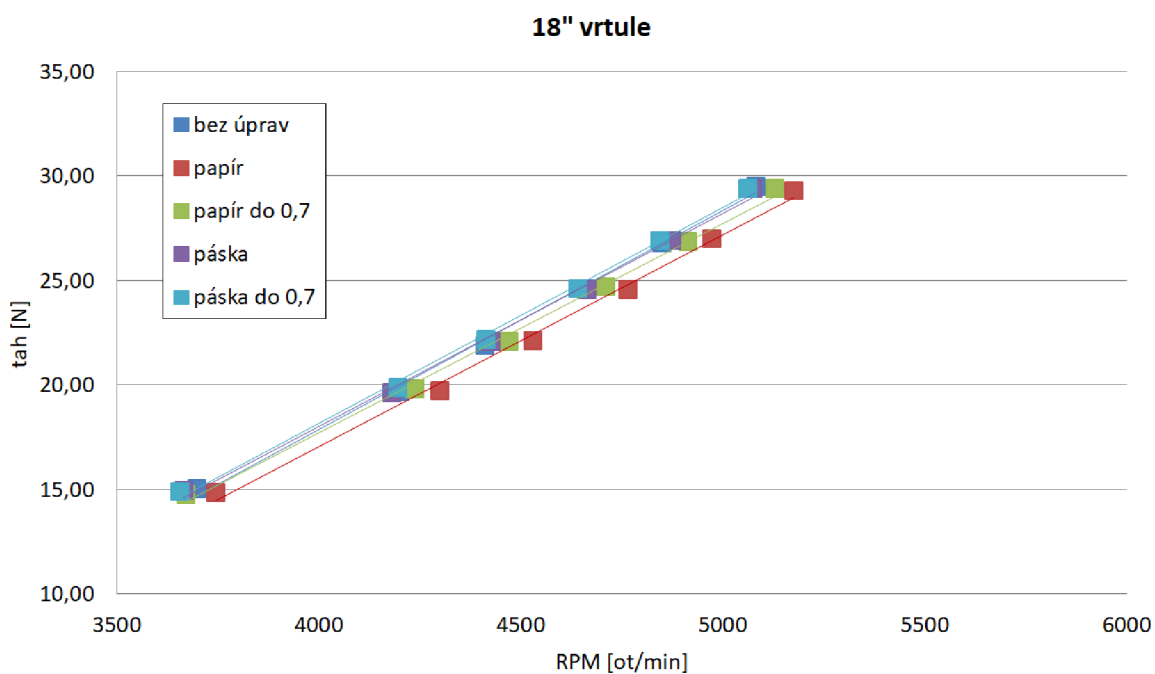
Výsledky frekvenčních spekter neukazují snížení širokopásmového hluku [33], viz obrázek 1.31.

3.4.4. Účinnost vrtulí s úpravami nosné plochy

Srovnání otáček pro konkrétní tah dává informaci o účinnosti vrtule. Jak je uvedeno v [11], snížení otáček má zásadní vliv na snížení hlučnosti vrtule.



Obrázek 3.17: Porovnání účinností 17" vrtule s úpravami nosných ploch.



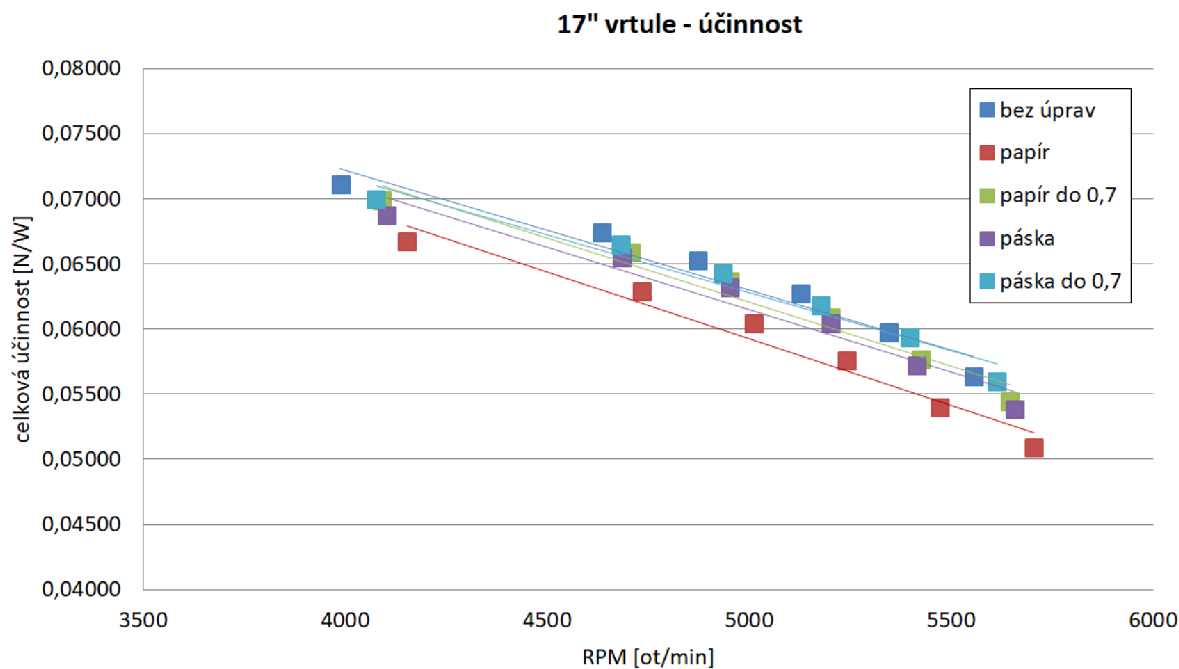
Obrázek 3.18: Porovnání účinností 18" vrtule s úpravami nosných ploch.

3.4. MĚŘENÍ VRTULÍ S TURBULÁTORY

Jak je z výsledků měření (obrázky 3.17 a 3.18) patrné, u obou vrtulí papírová páska způsobuje největší snížení účinnosti. Pro 17" vrtuli vykazuje nejvyšší účinnost vrtule bez úprav, u 18" vrtule vykazují kromě papírové pásky všechny úpravy srovnatelnou účinnost.

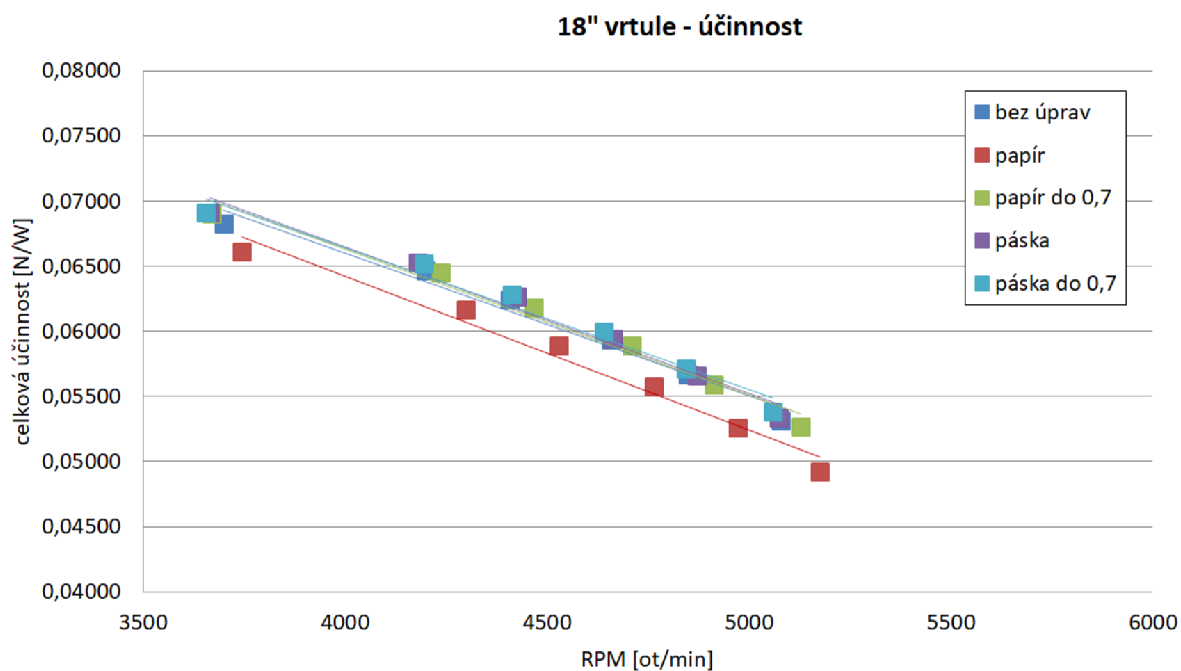
Tyto hodnoty odpovídají předpovězenému trendu mírného snížení klouzavosti pro vynucené proudění uvedeném v tabulce 2.5.

Měřena byla také celková účinnost pohonného ústrojí. Celková účinnost určuje, jaký příkon je potřeba dodat vrtuli, aby vyvinula daný tah. Celková účinnost pohonného ústrojí zahrnuje účinnost celé sestavy včetně použitého elektromotoru.



Obrázek 3.19: Srovnání účinnosti 17" vrtule s různými úpravami.

Na základě výsledků měření účinnosti 17" vrtule, viz obrázek 3.19, je patrné, že nejnižší účinnost napříč celým spektrem výkonu má vrtule opatřená papírovou páskou. Použitím průhledné pásky do 0,7 délky listu bylo dosaženo téměř podobné účinnosti jako vrtule bez úprav.



Obrázek 3.20: Srovnání účinnosti 18" vrtule s různými úpravami.

Výsledky účinnosti 18" vrtule (obrázek 3.20) ukazují také na nižší účinnost při použití papírové pásy po celém listu. Zbylé typy turbulátorů dosahují srovnatelné účinnosti jako vrtule bez úprav.

Závěr

Při zpracování této diplomové práce byla sepsána rešerše shrnující teorie návrhu vrtulí, akustiku a zdroje hluku rotorů s důrazem na předchozí výzkumy zabývající se různými prostředky vedoucími ke snížení hluku vrtulí.

V praktické části je popsán postup měření a vizualizace proudění v anechoické komoře. Dále je zde uvedeno ověření vzniku separačních bublin pomocí výpočtu rozložení tlaku na profilu v programu XFOIL a následné určení polohy turbulátorové pásky.

Výsledky práce popisují porovnání měření intenzity hluku v odhlučněném a neodhlučněném prostoru, frekvenční charakteristiku a měření vrtulí s několika druhy a délkami turbulátorů.

Měření v neodhlučněném prostoru v porovnání s anechoickou komorou má za následek zvýšení intenzit hluku převážně u nižších frekvencí. Dochází také k výraznému zkreslení výsledné hodnoty intenzity hluku. Neodhlučněný prostor také komplikuje opakovatelnost měření, protože nejsou eliminovány vnější vlivy.

Vizualizace proudění v anechoických komorách a kolem mikrofونů ukázaly, že obě použité anechoické komory jsou pro vrtule o rozměrech 14" až 18" vhodné a vzájemné porovnání frekvenčních spekter ukázalo, že ani v jedné komoře nedochází ke zkreslení výsledků. Měření vrtule v diagonálním směru se ukázalo jako výhodnější, protože roh anechoické komory lépe izoluje zpětné proudění, které může ovlivňovat měření akustických veličin.

Opakovaným měřením stejné vrtule v rozestupu několika hodin byla ověřena opakovatelnost měření v anechoické komoře s použitím daného měřicího zařízení.

Použití turbulátorů nevedlo ke snížení intenzity hluku, jak bylo avizováno v předchozích výzkumech. Výpočty rozložení tlaku po profilu ukázaly, že vznik separačních bublin je závislý na typu použitého profilu, úhlu náběhu, Reynoldsově čísla a dalších aspektech, které v předchozích výzkumech nejsou detailně popsány.

Použití různých druhů a rozpětí turbulátorů výrazně ovlivňuje výslednou intenzitu hluku a účinnost. Tloušťka a délka turbulátorové pásky podle výsledků významně ovlivňuje výsledné charakteristiky vrtule. Použitá papírová páska o větší tloušťce způsobila u 17" vrtule výrazné zvýšení intenzity hluku při vysokých otáčkách. Mírné snížení intenzity hluku při nižších otáčkách nelze kvůli chybám měření brát za průkazné. Pro 18" vrtuli byl pozorován opačný trend, kdy v nejnižších otáčkách došlo ke zvýšení intenzity hluku a se zvyšujícími se otáčkami došlo k relativnímu srovnání hodnot oproti ostatním úpravám vrtule. Použití tenké pásky nemělo za následek výrazné změny v charakteristikách vrtulí oproti sériovým vrtulím. Tyto výsledky signalizují rozdílné chování jednotlivých vrtulí s úpravami listu a ukazují na nutnost detailního studia vlivu turbulátorů na akustické a výkonové charakteristiky.

Porovnání otáček upravených vrtulí pro konkrétní hodnoty tahu ukazuje, že úpravami listů došlo k mírnému zhoršení účinnosti ve všech případech úprav, nejvýrazněji pak při použití papírové pásky. Celková účinnost pohonného ústrojí zahrnující i poměr dodaného výkonu k výslednému tahu ukázala podobný trend ve snížení celkové účinnosti při úpravách listu.

Frekvenční spektra jednotlivých měření ukázala srovnatelné hodnoty všech variant úprav vrtulí, kromě papírové pásky, která měla ve vybraných frekvencích výrazně vyšší intenzity hluku, což mělo za následek zvýšení celkové hladiny hluku. Nepotvrdily se tedy

3.4. MĚŘENÍ VRTULÍ S TURBULÁTORY

výsledky předchozích studií, u kterých došlo k výraznějšímu snížení širokopásmového hluku.

Pro ověření vzniku a určení separačních bublin by bylo potřeba použít měření v aerodynamickém tunelu, které by existenci separačních bublin jednoznačně potvrdilo.

Lepší pochopení akustických jevů by šlo docílit použitím akustické kamery, která je schopná přesně lokalizovat zdroj hluku. Akustická kamera byla pro použití na vrtulích testována, nicméně nepřinesla uspokojivé výsledky.

Eliminaci případných nepřesností způsobených při lepení turbulátorů lze docílit vytvořením odsazení na formě, které by sloužilo jako zadní hrana turbulátorové pásky.

Literatura

- [1] CARLTON, J. S. *Marine propellers and propulsion*. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012, s. 79. ISBN 978-0-08-097123-0.
- [2] SPARKOVŠKY, Zoltán S. Performance of Propellers. *16.Unified: Thermodynamics and Propulsion* [online]. Massachusetts Institute of Technology, USA: MIT, 2006 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node86.html>
- [3] LEISHMAN, J. Gordon; ANANTHAN, Shreyas. Aerodynamic optimization of a coaxial proprotor. In: *Annual Forum Proceedings-American Helicopter Society*. American Helicopter Society, INC, 2006. p. 64.
- [4] LEISHMAN, J. Gordon. *Principles of helicopter aerodynamics*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2006. ISBN 978-0-521-85860-1.
- [5] MAHDI. 5. *Propeller Theories* [online]. In: . 2011, s. 1-15 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/47810851/Ship-Hydrodynamics-Lecture-Notes-Part-5-Propeller-Theories4>
- [6] PRANDTL, Ludwig. Applications of Modern Hydrodynamics to Aeronautics. JONES, R.T. NASA. *Classical Aerodynamic Theory*. Ames Research Center, NASA Moffett Field, California 94035: National Aeronautics and Space Administration, 1979, s. 12-56. Dostupné také z: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19800006774>
- [7] Clancy, L. J. (1975). *Aerodynamics*. London: Pitman. Section 4.5. ISBN 0-273-01120-0.
- [8] CLEYNEN, Olivier. *Fluid Dynamics for Engineers* [online]. Magdeburg: Otto von Guericke University Magdeburg, 2020 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://fluidmech.ninja/>
- [9] HOUGHTON, E.L., P.W. CARPENTER, Steven H. COLLICOTT a Daniel T. VALENTINE. *Aerodynamics for Engineering Students. Seventh edition*. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, United Kingdom: Elsevier, 2017, ISBN 978-0-08-100194-3.
- [10] JAHODA, M. Počítačová dynamika tekutin – užitečný nástroj pro inženýry. *Ústav chemického inženýrství* [online]. Praha: VŠCHT, Ústav chemického inženýrství, c2012-2020 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: http://uchi-old.vscht.cz/uploads/pedagogika/bezpecnostni_inzenyrstvi/CFD.shrnuti.pdf
- [11] MADEJEWSKI, Bohumil. *Aeroakustika, základy teorie a aplikace na konstrukci letadel*. Ediční středisko VUT Brno, Vlhká 25: Rektorát VUT v Brně, 1986. ISBN 55-587/1-86.
- [12] ČSN IEC 50(801). *Mezinárodní elektrotechnický slovník - Kapitola 801: Akustika a elektroakustika*. Praha: Český normalizační institut, 2001. Třídící znak: 33 0050.

- [13] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 6. vydání. Brno: VUTIUM, 2000, s. 441. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN ISBN 80-214-1869-9.
- [14] Weber-Fechnerův zákon. *WikiSkripta* [online]. Praha: MediaWiki, 2015, 2015 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Weber-Fechner>
- [15] ŠVÁBOVÁ, Kateřina. *Vybrané kapitoly z pracovního lékařství díl 3: Fyzikální faktory v pracovní prostředí, návykové látky* [online]. 3. vydání. Praha: Institut postgraduálního vzdělávání ve zdravotnictví, Ruská 85, 2015, s. 11-12 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://www.ipvz.cz/seznam-souboru/2357-vybrane-kapitoly-z-pracovniho-lekarstvi-dil-3.pdf#page=12>
- [16] SCHAUER, Pavel. *Vybrané statě z akustiky* [online]. Ústav fyziky, Fakulta stavební, VUT, 2008 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/vybrane_state_z_kustiky.pdf
- [17] MARTE, Jack E. a Donald W. KURZ. *A Review of Aerodynamic Noise From Propellers, Rofors, and Lift Fans: Technical Report 32-7462*. Pasadena, California, 1970. Technical Report. California Institute of Technology, Pasadena, California.
- [18] GUTIN, L. On the Sound Field of a Rotating Propeller. *Physical magazine of the Soviet Union*. National Advisory Committee for Aeronautics. Langley Aeronautical Lab., Langley Field, VA, United States, 1948, 1948(9), 1-22. Technical Report NACA-TM-1195. Dostupné také z: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20030068996>
- [19] FILIP, Petr. Vlastnosti vzduchu. *E-konstruktor: Portál pro strojní studenty* [online]. Praha, 2013 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://e-konstruktor.cz/prakticka-informace/vlastnosti-vzduchu>
- [20] SERDAR, M., İYAS KARASU, H. HAKAN a M. TURUL. Low Reynolds Number Flows and Transition. *Low Reynolds Number Aerodynamics and Transition* [online]. InTech, 2012, 2012-04-04 [cit. 2020-06-13]. DOI: 10.5772/31131. ISBN 978-953-51-0492-6. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/low-reynolds-number-aerodynamics-and-transition/low-reynolds-number-flows-and-transition>
- [21] CARMICHAEL, B. H. Low Reynolds number airfoil survey, volume 1. *NASA Technical Reports Server* [online]. United States: Low Energy Transport Systems; Capistrano Beach, CA, United States, 1981 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19820006186>
- [22] LNĚNIČKA, Jaroslav a Jan JANOVEC. Podobnost v aerodynamice. *E-magazín Akademie letectví* [online]. 2008 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <http://www.airspace.cz/akademie/rocnik/2008/03/podobnost.php>
- [23] SELIG, Michael S., DONOVAN a FRASER. *Airfoils at Low Speed*. 1504 North Horeshoe Circle, Virginia Beach, Virginia 23451: H. A. Stokely, 1989. Dostupné také z: https://m-selig.ae.illinois.edu/uiuc_lsai/Airfoils-at-Low-Speeds.pdf

- [24] ZDRAVKOVICH, M. M. *Flow around circular cylinders: a comprehensive guide through flow phenomena, experiments, applications, mathematical models, and computer simulations*. Oxford: Oxford University Press, 2003. Oxford science publications. ISBN 978-019-8565-611.
- [25] SODEMAN, Paul. Leading edge serrations which reduce the noise of low-speed rotors. *NASA Technical Reports Server* [online]. NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA, United States: NASA Technical Reports Server, 1973, 1 August 1973 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19730019166>
- [26] LNĚNIČKA, Jaroslav a Jan JANOVEC. Doplnky nosných (i ocasních) ploch pro zlepšení jejich obtékání a účinnosti. *E-magazín Akademie letectví* [online]. 2009, 30. 11. 2009 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <http://www.airspace.cz/akademie/rocnik/2010/01/doplanky.php>
- [27] Smart Blade. *Smart Blade* [online]. Ravensburg: SMART BLADE, 2020 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://www.smart-blade.com/vortex-generators>
- [28] LYON, Christopher A., Andy P. BROEREN, Philippe GIGUÉRE, Ashok GOPALARATHNAM a Michael S. SELIG. *Summary of Low-Speed Airfoil Data: Volume 3*. 1997. 1504 N. Horseshoe Circle Virginia Beach, Virginia 23451, USA: SoarTech Publications, 1997, str. 331-342. ISBN 0-9646747-3-4.
- [29] SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI, J. a R. T. HAFTKA. Multidisciplinary aerospace design optimization: survey of recent developments. *Structural Optimization* [online]. 1997, 14(1), 1-23 [cit. 2020-06-18]. DOI: 10.1007/BF01197554. ISSN 0934-4373. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF01197554>
- [30] Betz, A., *Schraubenpropeller mit Geringstem Energieverlust*, Vol. 2, Königliche Gesellschaft der Wissenschaften, Göttingen, Germany, 1919, pp. 193–217;
- [31] RONCZ, John G. *Propeller development for the Rutan Voyager*. SAE Technical Paper, 1989.
- [32] GUR, Ohad a Aviv ROSEN. Design of Quiet Propeller for an Electric Mini Unmanned Air Vehicle. *Journal of Propulsion and Power* [online]. 2009, 25(3), 717-728 [cit. 2020-06-15]. DOI: 10.2514/1.38814. ISSN 0748-4658. Dostupné z: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.38814>
- [33] LESLIE, Angus, Kee Choon WONG a Doug AULD. Broadband Noise Reduction on a mini-UAV Propeller. *14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (29th AIAA Aeroacoustics Conference)* [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008, 2008-05-05, 2008, - [cit. 2020-02-28]. DOI: 10.2514/6.2008-3069. ISBN 978-1-60086-983-9. Dostupné z: <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2008-3069>
- [34] CORREA, L. N. G., R. M. U. ENTZ, R. COSIN a F. M. CATALANO. Acoustic Control of Laminar Separation Bubbles. *27th International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS)* [online]. Nice, France, 2010, 2010, (27th) [cit. 2020-04-16]. Dostupné z:

https://www.researchgate.net/profile/Fernando_Catalano/publication/326752286_ACOUSTIC_CONTROL_OF_LAMINAR_SEPARATION_BUBBLES/links/5b61f59baca272a2d67af906/ACOUSTIC-CONTROL-OF-LAMINAR-SEPARATION-BUBBLES.pdf

- [35] STEPHENSON, James H., Daniel WEITSMAN a Nikolas S. ZAWODNY. Effects of flow recirculation on unmanned aircraft system (UAS) acoustic measurements in closed anechoic chambers. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. 2019, 145(3), 1153-1155 [cit. 2020-03-29]. DOI: 10.1121/1.5092213. ISSN 0001-4966. Dostupné z: <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.5092213>

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratky

UAV	Unmanned Aerial Vehicle, bezpilotní letoun
DL	Disc Loading, zatížení disku
PL	Power Loading, výkonové zatížení
VTOL	Vertical Take-off and Landing, letoun startující i přistávací vertikálně
BEMT	Blade Element Momentum Theory
CFD	Computational Fluid Dynamics, počítačová dynamika proudění
MDO	Multidisciplinary Design Optimization, mezioborová optimalizace návrhu
ÚADI	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
RPM	Revolutions per minute, otáčky za minutu

Symboly

c_T [-]	koeficient tahu
c_Q [-]	koeficient kroutícího momentu
c_P [-]	koeficient výkonu
J [-]	postupový koeficient
T [N]	tah
Q [Nm]	kroutící moment
P [W]	výkon vrtule
ρ [kg·m ⁻³]	hustota vzduchu
n [ot·s ⁻¹]	otáčky vrtule
D [m]	průměr vrtule
V_a, V_A [m·s ⁻¹]	rychlost nabíhajícího proudu vzduchu
P_{in} [W]	příkon
P_{out} [W]	výstupní výkon
η [-]	účinnost vrtule
σ [-]	hustota lopatkové mříže
N_b [-]	počet listů vrtule
c [m]	ekvivalentní délka tětiny profilu

S [m^2]	průtočná plocha vrtule
\dot{m} [-]	hmotnostní tok
E_A [J]	energie absorbovaná vrtulí
E_D [J]	energie dodaná vrtulí
η_0 [-]	maximální teoretická účinnost vrtule
dT [-]	tah izolovaného profilu listu
dQ [-]	kroučící moment izolovaného profilu listu
dL [-]	vztlaková síla izolovaného profilu listu
dD [-]	odporová síla izolovaného profilu listu
ω [rad^{-1}]	úhlová rychlost
r [m]	poloměr vrtule
α [$^\circ$]	úhel náběhu
β [$^\circ$]	úhel zkroucení listu
Γ [$m^2 \cdot s^{-1}$]	cirkulace
Γ_1, Γ_2 [$m^2 \cdot s^{-1}$]	rozdílné cirkulace mezi dvěma průřezy
θ [$^\circ$]	úhel proudění v tečném směru
C [-]	uzavřená křivka popisující tvar profilu
A_R [-]	štíhlost listů
F_S	setrvačné síly
F_m	hmotnostní (objemové) síly
F_p	tlakové síly
F_t	třecí síly
A [-]	okamžitá hodnota určující veličiny
A_{max} [-]	okamžitá hodnota určující veličiny
φ [$^\circ$]	fázový úhel
A_{ef} [-]	okamžitá hodnota určující veličiny
A_{st} [-]	střední hodnota určující veličiny
p [Pa]	akustický tlak
λ [m]	vlnová délka
c_s [$m \cdot s^{-1}$]	rychlost zvuku
I [$W \cdot m^{-2}$]	intenzita zvuku

P_A [W]	akustický výkon zdroje
P_0 [W]	referenční hodnota akustického výkonu
I_0 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	prahová intenzita zvuku
L_P [dB]	hladina intenzity zvuku
p_0 [Pa]	referenční hodnota akustického tlaku
f [Hz]	frekvence
L_{pi} [dB]	hladina akustického tlaku v daném pásmu
L_A [dBA]	Hladina akustického tlaku vyhodnocená pomocí filtru A
m [-]	řád harmonické frekvence
z, ϑ [-]	polární souřadnice místa pozorovatele
J_{mb} [-]	Besselova funkce
Re [-]	Reynoldsovo číslo
d [mm]	hloubka profilu
ν [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]	kinematická viskozita

Seznam obrázků

1.1	Znázornění účinnosti ve visu pro různé druhy VTOL letounů v závislosti na zatížení disku v logaritmickém měřítku. [4]	5
1.2	Znázornění hybnostní teorie. [5]	6
1.3	Silová rovnováha vybrané části listu vrtule. dT je tah, dQ kroutící moment, dL vztlak, dD odpor, V_A rychlost nabíhajícího proudu, ωr obvodová rychlost, V_R výsledná rychlost, α úhel náběhu a β úhel zkroucení listu. [5]	7
1.4	Znázornění cirkulace podle Kutta-Joukowski teorému. $\delta\Gamma$ ukazuje směr parciální cirkulace mezi dvěma průřezy křídla s rozdílnými cirkulacemi Γ_1 a Γ_2 . [8]	8
1.5	Ukázka diskretizace povrchu 2D profilu. [9]	9
1.6	Navier-Stokesovy rovnice pro jednofázové trojrozměrné neustálené proudění při konstantní hustotě a viskozitě. Nutné vyřešit ve všech třech směrech. [10]	9
1.7	Veličiny popisující jednoduchý akustický signál. [11]	11
1.8	Naznačení vlnové délky na sinusovém signálu. [13]	12
1.9	Spojité spektrum [16]	16
1.10	Diskrétní spektrum [16]	16
1.11	Smíšené spektrum [16]	17
1.12	Pulzující koule v prostoru znázorňující model monopólového zdroje hluku.[17]	17
1.13	Modely dipólového zdroje zvuku.[17]	18
1.14	Modely kvadrupólového zdroje hluku.[17]	18
1.15	Rozdělení aerodynamických zdrojů hluku u vrtulí.[17]	19
1.16	Teoretické tvary akustických polí rotorů, vrtulí a ventilátorů. Upraveno a převzato z [17].	21
1.17	Srovnání naměřené (vlevo) a spočtené (vpravo) intenzity akustického pole. [18]	22
1.18	Režimy obtékání válce v závislosti na Reynoldsově čísle. a) plně laminární obtékání, b) vznik separace proudění a formování symetrických vírů, c) periodické odplouvání vírů (Kármánovy víry), d) laminární separace s širokým turbulentním úplavem, e) laminární separace proudění s turbulentním přilnutím a následnou turbulentní separací e) čistě turbulentní separace proudění. [9]	23
1.19	Přibližné hodnoty koeficientu odporu v závislosti na Reynoldsově čísle pro kouli a nekonečně dlouhý válec. [9]	24
1.20	Příklady hodnot Reynoldsových čísel pro různé objekty. [22]	25
1.21	Vizualizace proudění kolem profilu NACA 0025 pro Reynoldsova čísla a) 55 000 a b) 210 000 při úhlu náběhu 5°. Zvýšení Reynoldsova čísla má za následek přilnutí proudění. [20]	25
1.22	Znázornění a popis laminární separační bubliny. Upraveno a převzato z [9]	26
1.23	Fáze přechodového proudění a jejich vliv na hodnoty tlaku po délce profilu. [34]	27
1.24	Úpravy a dodatečná zařízení nosných ploch pro ovlivnění proudění. Upraveno a převzato z [26].	28
1.25	Příklad použití vortex generátorů. Upraveno a převzato z [26].	29
1.26	Vliv redukce separační bubliny na tvar poláry profilu. [28].	30

1.27	Umístění turbulátorových pásek na profilech E374 a SD7037 [28].	30
1.28	Závislost koeficientu odporu na pozici turbulátorové pásky pro Reynoldsova čísla $1 \cdot 10^5$, $2 \cdot 10^5$ a $3 \cdot 10^5$. $s = 0$ odpovídá pozici 46 % délky tětiny a $s = 4$ odpovídá 13 % délky tětiny. [28]	31
1.29	Vizualizace proudění na profilu E374 s pilovitou turbulátorovou páskou o různých tloušťkách (0,38 a 0,76 mm) v pozici $x/c = 30\%$, $Re = 200\,000$. [28]	32
1.30	Vliv turbulátorové pásky na aerodynamické a akustické vlastnosti. [33]	34
1.31	Porovnání frekvenčních spekter hluku vrtule s turbulátorovou páskou a bez ní. [33]	34
1.32	Modifikace nosné plochy při optimální efektivitě vrtule 60 % (úhel náběhu $1,5^\circ$ v místě 80 % relativního rozpětí) a její vliv na hluk vrtule při daných otáčkách. Žlutá křivka označuje použití zoubkovaného turbulátoru, růžová označuje použití jednoduché pásky jako turbulátor. [33]	35
2.1	Ilustrační fotografie anechoické komory na ÚADI (vlevo) a prostoru firmy (vpravo), kde byla měření prováděna.	36
2.2	Schéma rozložení měřicího standu s vrtulí a měřicím mikrofonom.	37
2.3	Fotografie hůlky s navázanými provázky pro vizualizaci cirkulace vzduchu.	38
2.4	Popis diagramu cirkulace vzduchu v anechoické komoře.	39
2.5	Vizualizace proudění v anechoické komoře Resideo pro 14" a 18" vrtule v kolmém a diagonálním směru.	39
2.6	Profil listu v místě 75% relativního rozpětí s úhlem náběhu $\alpha = 8,45^\circ$	40
2.7	Příklad výpočtu rozložení tlaku v XFoilu.	42
2.8	Výpočet rozložení tlaku pro tah 19,6 N exportovaný z XFoilu. Jednotlivé křivky odpovídají relativním poloměrům po rozpětí vrtule.	43
2.9	Výpočet rozložení tlaku pro tah 27,5 N exportovaný z XFoilu. Jednotlivé křivky odpovídají relativním poloměrům po rozpětí vrtule.	43
2.10	Rozložení tlaku na profilu v intervalech po celém rozpětí vrtule. Porovnání profilu původního a s vynuceným přechodem v $x/c = 0,05$ pro tahy 19,6 N a 27,5 N.	45
3.1	Závislost hladiny intenzity hluku na průměru použité vrtule pro vybrané tahy. Měření v anechoické komoře (vlevo) a ve firmě Mejzlík (vpravo).	48
3.2	Srovnání intenzity hluku v kolmém a diagonálním směru v anechoické komoře Resideo.	48
3.3	Frekvenční spektrum 14" vrtule pro tah 14,7 N a otáčky: 5984 ot/min - firma Mejzlík; 6072 ot/min - Resideo a 6286 ot/min - ÚADI.	49
3.4	Frekvenční spektrum 14" vrtule pro tah 18,6 N a otáčky: 6976 ot/min - firma Mejzlík; 6904 ot/min - Resideo a 7170 ot/min - ÚADI.	49
3.5	Frekvenční spektrum s vyznačenými harmonickými frekvencemi.	50
3.6	17" vrtule s nalepenou izolepou sloužící jako turbulátor.	51
3.7	17" vrtule s nalepenou papírovou páskou sloužící jako turbulátor.	51
3.8	Srovnání ekvivalentních hladin hluku 17" vrtule s různými úpravami nosných ploch.	52
3.9	Srovnání ekvivalentních hladin hluku 18" vrtule s různými úpravami nosných ploch.	53
3.10	Opakované měření 17" vrtule bez úprav s časovým rozestupem čtyř hodin.	54
3.11	Frekvenční spektra 17" vrtule s úpravami listů. Tah 27,0 N.	55
3.12	Frekvenční spektra 17" vrtule s úpravami listů. Tah 29,4 N.	56

3.13	Frekvenční spektra 18" vrtule s úpravami listů. Tah 14,7 N.	57
3.14	Frekvenční spektra 18" vrtule s úpravami listů. Tah 19,6 N.	57
3.15	Frekvenční spektra 18" vrtule s úpravami listů. Tah 27,0 N.	58
3.16	Frekvenční spektra 18" vrtule s úpravami listů. Tah 29,4 N.	58
3.17	Porovnání účinností 17" vrtule s úpravami nosných ploch.	59
3.18	Porovnání účinností 18" vrtule s úpravami nosných ploch.	59
3.19	Srovnání účinnosti 17" vrtule s různými úpravami.	60
3.20	Srovnání účinnosti 18" vrtule s různými úpravami.	61