



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

KONCE LISTŮ ROTAČNÍCH KŘÍDEL

ROTARY WING BLADE TIPS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matěj Dlouhý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Edmund Havran

BRNO 2025

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Matěj Dlouhý**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Edmund Havran**
Akademický rok: 2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konce listů rotačních křídel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Konec listu vrtule má hlavní podíl na nechtěných jevech proudění v případech rotačních křídel. Již bylo vynalezeno mnoho způsobů, jak je zmírnit, výzkum byl hlavně v posledních letech podpořen dostupností CFD a rozmachem bezpilotního průmyslu. Zejména pro navrhování nových prostředků UAM nebo UAV může být správa indukovaného víru velice přínosná.

Cíle bakalářské práce:

Prozkoumejte a porovnejte různé způsoby řízení proudění kolem špičky listu rotačního křídla.

Seznam doporučené literatury:

JOHNSON, Wayne. Helicopter theory. New York: Dover Publications, 1994. ISBN 0486682307.

LEISHMAN, J. Gordon. Principles of helicopter aerodynamics. Second edition.; Reprinted. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. ISBN 978-1-107-01335-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá prouděním na koncích listů rotačních křídel vrtulníků, UAV a UAM. Rotací vrtulí vznikají koncové víry, které snižují aerodynamickou efektivitu a zvyšují indukovaný výkon a hlučnost. Efektivním způsobem, jak snížit tyto ztráty i hluk, je použití listů se speciálními tvary. Mezi nimi vynikají Blue Edge, BERP, nebo kombinované tvary používající sklon konce listu. Novinkou je Eagle *tip*, který by mohl zvýšit koeficient tahu o více jak 4%, FoM o 17% a zároveň snížit hlučnost. Více než u vrtulníků je snaha snížit hlučnost UAV a UAM, kterým brání v používání v městských zónách. Tato práce proto dále zkoumá, zda se na ně nedají aplikovat stejné postupy, jako u vrtulníků. Moderním trendem je také toroidní vrtule, která by mohla u UAV snížit hluk až o 5 dB nebo použití *ducted fan* u UAM, které by mohlo snížit indukované ztráty až o 10%. Výhodné se zdají také vrtule inspirované přírodou, které umožní snížit otáčky při stejném tahu a tím snížit tonální hluk UAV až o 4 dB.

Klíčová slova:

indukovaný výkon, Blue Edge *tip*, Eagle *tip*, UAM, toroidní vrtule, *ducted fan*

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on airflow around the ends of rotary wing blades of helicopters, UAV and UAM. Rotating propeller generates tip vortices which reduce aerodynamic efficiency and increase induced power and noise. An effective measure decreasing those losses and noise is the use of special blade tip shapes. Blue Edge, BERP or combined shapes utilizing anhedral are standing out among them. A novelty is Eagle tip which could increase the lift coefficient by more than 4 %, FoM by 17% and furthermore reduce the emitted noise. The effort to reduce the emitted noise is even more prominent for UAV and UAM than for helicopters, because excessive noise prevents their deployment in urban areas. That is why this work further investigates the principles of helicopter blade tips for potential application to them. Another modern trend is a toroidal propeller, that could reduce the emitted noise by up to 5 dB on UAV or the application of a ducted fan on UAM, that could reduce the induced power losses by up to a 10%. Bio-inspired propellers seem to be favourable as well because they allow a reduction of RPMs while maintaining the same thrust and thereby decreasing the tonal noise by up to 4 dB.

Key words:

Induced power, Blue Edge tip, Eagle tip, UAM, toroidal propeller, ducted fan

Bibliografická citace

DLOUHÝ, Matěj. *Konce listů rotačních křídel*. Online, bakalářská práce. Edmund HAVRAN (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165998>. [cit. 2025-05-23].

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem. Zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Edmunda Havrana a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 23. května 2025

.....

Matěj Dlouhý

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Edmundovi Havranovi za jeho cenné rady, připomínky i za svůj soukromý čas.

Obsah

úvod	10
2 Teoretické pojmy	11
2.1 Související s výkonem	11
2.2 Související s hlukem.....	15
3 Vrtulníky	17
3.1 Šípovitost (sweep).....	17
3.1.1 Směrem vzad	17
3.1.2 Směrem vpřed (forward)	18
3.1.3 Dvojitá šípovitost	18
3.2 Lichoběžníkový (taper)	20
3.3 Parabolický.....	21
3.4 Sklon (anhedral).....	22
3.5 Tiché konce	24
3.5.1 Vane	24
3.5.2 Ogee.....	25
3.5.3 Canard	25
3.5.4 TAMI	26
3.6 Eagle	26
3.7 Speciální konce	27
3.7.1 BERP	27
3.7.2 AGB	28
3.7.3 ATR.....	29
3.7.4 ERATO	29
3.7.5 Blue Edge.....	29
4 Drony.....	30
4.1 Toroidní vrtule	30
4.2 Počet listů	32
4.3 Přírodou inspirované vrtule.....	33
4.4 Šípovitý list dronu.....	35
4.5 Ducted fan.....	35
4.5.1 Indukovaný výkon.....	36
4.5.2 hlučnost	36
4.5.3 komplikace	36
4.5.4 Volba parametrů	38

5	UAM.....	39
5.1	UAM s ducted fan.....	39
5.2	UAM s otevřenými vrtulemi	40
6	Zhodnocení.....	41
	Závěr.....	44
	Seznam použitých zdrojů	45

úvod

S rozvojem technologií je čím dál větší snaha optimalizovat a zvyšovat efektivnost zařízení a letecký průmysl z toho není výjimkou. U pevných křídel se již běžně používají „winglety“ různých podob a tvarů, které snižují indukované ztráty a odpor křídel. Podobné modifikace se vyskytují i u rotačních křídel, protože konce listů a vrtulí mají velký podíl na výsledném odporu a hluku.

Snižování ztrát může zlepšit letové vlastnosti, snížit spotřebu paliva a zvýšit dolet. Zvýšení doletu by byl veliký přínos hlavně pro eVTOL a vrtulníky s elektrickým pohonem, u kterých je zatím nízký dolet velkým limitem. Hlučnost zase brání rozšíření dronů a leteckých taxi (UAM) do hustě osídlených oblastí. Odstranění těchto limitů by zásadně změnilo způsob doručování zásilek a přepravu osob ve velkoměstech. Na [obrázku 1](#) můžeme vidět vizualizaci fungující městské letecké mobility, která by mohla usnadnit přepravu osob v dopravně přetížených městech a spojit tak praktický dopravní prostředek s radostí z létání.

Existují různé podoby konců rotačních křídel, ale není jednotný přístup k jejich používání. Tato práce má proto za cíl zanalyzovat dosavadní výzkum a zkušenosti a pokusit se vybrat ty nejefektivnější a nejméně hlučné tvary konců pro různé letové režimy a velikosti.

Proudění kolem konce rotačního křídla také může být ovlivněno koncovými víry jiných listů nebo nerotujících prvků a proto se jedná o další oblast, která bude v této práci zanalyzována a zhodnocena.

V první části proběhne analýza konců listů u vrtulníků, následovaná porovnáním vlastností speciálních vrtulí UAV a v poslední části rychlé zhodnocení vrtulí UAM.



Obrázek 1: Vizualizace budoucnosti s UAM [1].

2 Teoretické pojmy

Rotační křídlo

Rotační křídlo je nadřazený termín pro vrtule různých tvarů a podob, které rotací vyvolávají tah nebo vztlak, případně se roztáčí díky působící síle.

Oblastí výzkumu této práce budou pouze vrtule vrtulníků, UAV a UAM.

Pro jednoduché rozlišení se zde listy vrtule vrtulníků označují jako listy rotoru, protože mají většinou nižší zatížení. UAV mají listy vrtule. Vrtule u UAV (unmanned aerial vehicle), nazývané také jako drony, mají zatížení zase vyšší. Z tohoto důvodu se mezi sebou vrtulníky a drony neporovnávají.

Za přechodný článek by se dalo považovat UAM (urban air mobility), často také označované jako eVTOL (electric vertical take-off and landing), pokud používá elektrický pohon. UAM, které mají podobnou velikost jako vrtulníky, ale větší počet menších rotorů, využívají některé prvky jako vrtulníky.

Kvůli menším listům rotorů mají vyšší otáčky a proto také větší zatížení listů, které mají obecně menší štíhlost, z těchto důvodů jsou v této práci adresovány jako vrtule.

Dron

Termínem dron se v této práci myslí bezpilotní stroj, který je zaměnitelný s UAV. Velikost dronu může být různá, ale veliké armádní UAV, které se podobají malým letounům, jsou z tohoto výčtu vyčleněny.

eVTOL

elektricky poháněné letadlo schopné kolmého vzletu a přistání, které se řadí mezi UAM.

2.1 Pojmy související s výkonem

Následuje výčet potřebných pojmů, které se objevují v této práci.

Rozpětí listu (blade span) R

Vzdálenost mezi osou rotace vrtule a koncem listu.

Plocha opsaná rotorem (rotor disc area) A

Plocha kolmá na osu otáčení rotačního křídla, opsaná rotujícími konci rotačního křídla. [2]

$$A = \pi \cdot R^2 \quad (1)$$

Plnost rotoru (solidity) σ

Jedná se o (bez jednotkový) poměr mezi plochou listů a plochou celého disku. Pro výpočet se předpokládá obdélníkový list a upravený vzorec pro plnost rotoru vypadá takto:

$$\sigma = \frac{N \cdot c}{\pi \cdot R} \quad (2)$$

N je počet listů rotoru a c je šířka střední tětivy (mean chord).

Obvyklé hodnoty se pohybují mezi 0,07 a 0,12. [3]

Reynoldsovo číslo (Reynolds number) Re

Reynoldsovo číslo je bezrozměrné porovnávací číslo, které je poměrem setrvačných a viskózních sil a charakterizuje proudění.

Machovo číslo (Mach number) Ma

Jedná se o další bezrozměrné porovnávací číslo, které je poměrem rychlosti objektu (zde konce listu) a rychlosti zvuku ve vzduchu za normálních podmínek.

Úplav (wake)

Prostor rozrušeného proudění, kde díky turbulenci dochází ke zhoršení aerodynamických vlastností

Tah (thrust) T

Síla vyvolaná rotací vrtule nebo obecně rotačního křídla kolem své osy otáčení. Je kolmá na rovinu vrtule a vzniká stejným principem, jakým vzniká vztlak na křídle, tedy rozdílem tlaků mezi horní a dolní částí křídla. [2]

Indukovaný výkon (induced power) P

Výkon potřebný k vytvoření vztlakové síly (která vzniká rozdílnými tlaky po povrchu) a nutný k překonání odporu koncových vírů. Nejmenší možný výkon lze spočítat podle tohoto vzorce.

$$P = T \cdot \sqrt{\frac{T}{2} \cdot \rho \cdot A} \quad (3)$$

Kde T je tah, ρ je hustota vzduchu a A je plocha opsaná rotorem. [2]

Postupový poměr (advance ratio) μ

Poměr mezi dopřednou rychlostí a obvodovou rychlostí konce vrtule. [2]

Profilový odpor (profile drag)

Jedná se o odpor způsobený obtékajícím vzduchem kolem profilu, který se skládá z odporu třením a odporu rozdílu tlaků. Teoreticky odpovídá změně hybnosti v uklidněném úplavu za křídlem vůči stavu před křídlem. Odpor je vzniklá síla, jejíž vektor vždy směřuje proti vektoru rychlosti. [4] Velký nárůst profilového odporu nastane při ztrátě vztlaku.

Indukovaný odpor (induced drag)

Tento odpor vzniká indukovanými koncovými víry na koncích listů rotorů, protože se část vztlakové síly spotřebuje na tvorbu vírů. [2]

Koeficient tahu (coefficient of thrust) C_T

Vzniklý tah T přepočítaný na plochu opsanou rotačním křídlem. ω je úhlová rychlost a R je rozpětí listu [2]

$$C_T = \frac{T}{\rho \cdot A \cdot (\omega \cdot R)^2} \quad (4)$$

Koeficient výkonu (coefficient of power) C_P

Potřebný výkon, neboli indukovaný výkon P přepočítaný na plochu opsanou rotačním křídlem. Kladný výkon je dodáván motorem. [2]

$$C_P = \frac{P}{\rho \cdot A \cdot (\omega \cdot R)^3} \quad (5)$$

Koeficient kroutícího momentu (coefficient of torque) C_Q

Potřebný kroutící moment Q přepočítaný na plochu opsanou rotačním křídlem.

$$C_Q = \frac{Q}{\rho \cdot A \cdot (\omega \cdot R)^2 \cdot R} \quad (6)$$

Pro výkon ve visu platí, že $P = \omega \cdot Q$, proto se v tom případě i $C_P = C_Q$. [2]

Koeficient vztlaku (coefficient of lift) C_L

Vzniklý vztlak L přepočítaný na plochu opsanou rotačním křídlem. [2]

$$C_L = \frac{L}{\rho \cdot A \cdot (\omega \cdot R)^2} \quad (7)$$

Zatížení vrtule (disc loading)

Poměr mezi tahem a plochou opsanou rotorem. Zatížení souvisí s rychlostí rotace, která je často popsána otáčkami za minutu. C_T je koeficient tahu. [2]

$$\frac{T}{A} = \frac{T}{A \cdot \sigma} = \frac{C_T}{\sigma} \quad (8)$$

Indukované ztráty výkonu (induced power loss)

Ztráta kinetické energie v úplavu vůči stavu před rotorem, která musí být dodávána motorem. Je způsobena indukovaným odporem. [2]

Profilové ztráty výkonu (profile power loss)

Ztráta kinetické energie kvůli profilovému odporu [2]. Profilové ztráty jsou více náchylné na rychlost rotace než ztráty indukovaného výkonu [5].

Účinnostní koeficient rotoru (Figure of merit) FoM

Číselná hodnota, která udává účinnost rotoru vrtulníku při vznášení se nad zemí. Přesněji jde o minimální potřebný výkon pro vznášení v poměru ke skutečnému výkonu. Je bez jednotky a někdy se také značí M .

Z teorie zachování hybnosti vyplývá minimální potřebný výkon P a celý vztah má pak tvar:

$$FoM = \frac{T \cdot \sqrt{\frac{T}{2} \cdot \rho \cdot A}}{P} = \frac{C_T^{3/2}}{\sqrt{2} \cdot C_P} \quad (9)$$

FoM v podstatě udává poměr mezi *profilovým výkonem* a *indukovaným výkonem* nebo také použitelný výkon vůči potřebnému vstupnímu výkonu [2].

Větší zatížení listu (vyšší rychlosti) zvýší indukovaný výkon relativně k výkonu na překonání profilového odporu. To zvýší FoM, ale neznamená to zlepšení efektivnosti [2]. Zvýšením zatížení (většinou zvýšením otáček) se totiž zvyšuje indukovaný výkon, (také vztlak) a bohužel i profilový od-

por, ale nezvýší se se stejnou závislostí. Profilový odpor vzroste o menší hodnotu a protože je vzorec FoM indukovaný výkon/(indukovaný + profilový), tak se FoM zvýší.

U helikoptér ve visu je běžně indukovaný výkon 60% a profilový výkon 30% ze ztrát nahrazovaných výkonem motoru [2].

Úhel zkrutu listu (blade twist angle) θ

Jedná se o úhel mezi tětivou kořene listu a tětivou konce listu. [3]

Prohnutí (camber)

Uvažujeme spojnicí bodů podél tětivy, které mají stejnou vzdálenost k hornímu a dolnímu povrchu profilu křídla. Podíl největší vzdálenost mezi touto spojnicí a tětivou vůči délce tětivy je maximální prohnutí. [3]

Ustupující list

List, jehož konec se otáčí od předku vrtulníku směrem k ocasu.

Při dopředném letu se sčítají vektory rychlosti rotace listu a rychlosti proudícího vzduchu, takže na ustupujícím listu vzniká oblast, kde vzduch proudí zpětně vůči listu a na té části hrozí ztráta vztlaku listu (stall). Ztráta vztlaku způsobí velké množství vírů, které zvýší celkovou hlučnost. Vytvoření systému vírů během ztráty vztlaku je velmi závislé na typu konce listu [6].

Separace prouděné (flow separation)

Jedná se o odtržení mezní vrstvy od povrchu listu, kvůli obrácenému tlakovému gradientu.

U laminárního proudění nastává odtržení při nižších úhlech náběhu než u turbulentního. [4]

Šířovitost (sweep) λ (Lambda)

Úhel šířovitosti konce listu je mezi náběžnou hranou celého listu a náběžnou hranou konce. Konec může být zahnutý dozadu i dopředu, ale dopředná šířovitost není běžná. Některé konfigurace využívají i dvojitou šířovitost, kdy je prostřední část zahnutá dopředu a krajní dozadu. Šířovitost také může být stupňovitá a pak má vnější část konce větší úhel šířovitosti.

Úhel sklopení listu (anhedral angle)

Úhel mezi rovinou listu a rovinou sklopeného konce při pohledu kolmo k ose rotace vrtule. U vrtulí se obecně sklápí pouze konce listů, protože sklopení snižuje indukovaný odpor koncových výrů, ale také snižuje účinnostní koeficient rotoru. Sklopení celé vrtule by mělo za následek snížení efektivnosti a kvůli odstředivým silám by byly listy neustále přetěžované.

Úhel sklopení vzhůru (dihedral angle)

Opakem sklonu (anhedralu). Pro představu lze říci, že úhly sklonu jsou u sklopení vzhůru záporné.

Štíhlost (aspect ratio) AR

U obdélníkového křídla jde o poměr mezi délkou listu a jeho šířkou. V obecném případě mezi

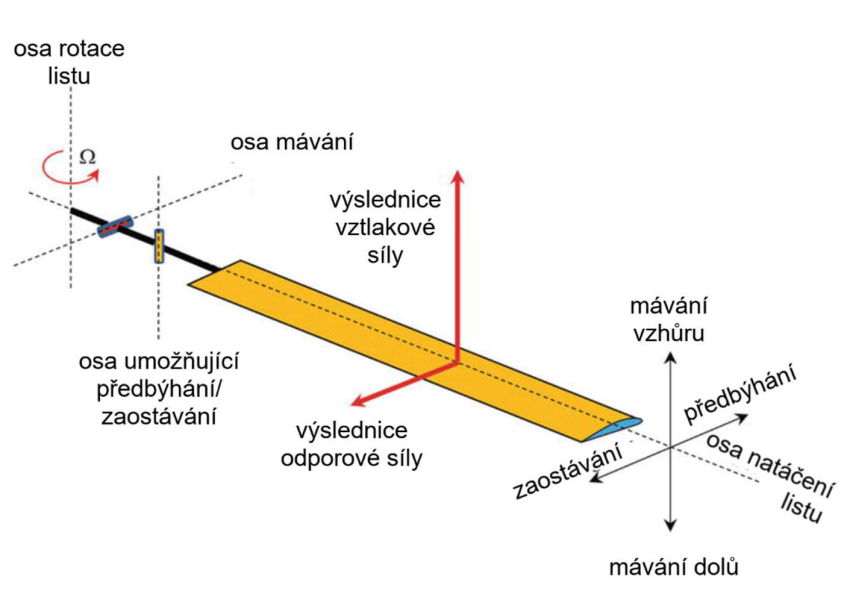
$$AR = \frac{l}{c} \quad (10)$$

délkou a šířkou střední tětivy c (mean chord). [2]

osa natáčení listu (feathering axis)

Osa, podle které se natáčí list, aby změnil úhel náběhu listu. Pro natočení všech listů zároveň slouží kolektiv, pro natáčení listů v určité poloze otáčky zase slouží cyklika. [7]

Kloubová hlava umožňuje pohyb listu kolem všech os, které jsou na obrázku 2.



Obrázek 2: Schéma os volnosti kloubové hlavy ([7], upraveno)

2.2 Pojmy související s hlukem

Tlakové zatížení způsobené rotující vrtulí vytváří změny v akustickém tlaku, které prostupují do prostoru jako hluk. Hluk vrtule se dá dělit na 2 kategorie, první je hluk harmonické frekvence a druhá je širokopásmový hluk. [8]

Hluk první z kategorií, hluk vlastní harmonické frekvence (tonal noise) je hlavní důvod proč jsou drony tolik rušivé, dokonce více nepříjemné než letadla s turbo-ventilátorovými (turbofan) motory nebo i vrtulníky [9].

Oblast vrtule blízko konce má často největší podíl na výsledném hluku kvůli nejrychlejší změně zatížení listu v kombinaci s největším vlivem Dopplerova jevu. Nezanedbatelný je také hluk způsobený vírem na konci listu, který vzniká rozložením vztlaku podél rozpětí listu. [10] Tyto složky hluku postupující od konců listů mají frekvenci závislou na otáčkách, takže se projevují jako hluk harmonické frekvence [11].

Odporové síly působící na vrtuli jsou hlavním zdrojem hluku od zatížení (loading noise) [8]. Ten patří mezi tonální hluk [11].

Hluk způsobený vysokou rychlostí (high-speed impulsive noise, HSI) je tím hlukem, který bude slyšet na velké vzdálenosti, protože ten se projevuje právě zmíněnými impulzy.

Frekvence průchodu listu (blade passing frequency) BPF

První frekvence závisí na frekvenci otáček násobená počtem listů a další frekvence jsou od ní odvozené [10].

hluk interakce listu s vírem BVI

Vzniká kolizí víru konce s rotujícím listem, takže je také tonální.

3 Vrtulníky

List rotoru vrtulníku je silně namáhaná součást a na jeho konec má největší obvodovou rychlost. S ohledem na moment setrvačnosti a celkovou hmotnost musí být i konec listu lehký, zároveň je ale vhodné, aby neměl příliš zmenšenou plochu, protože se blízko konce vytváří největší vztlak stejně jako u letadla.

S rozvojem materiálů se v druhé polovině minulého století postupně otevíraly možnosti pro experimentování s různými tvary konců listů vrtulníků [12]. Dříve také chyběly počítačové metody pro zhodnocení efektivity listů.

Zatím stále u vrtulníků platí, že země s různými výzkumy efektivity konců listů dospěly k lehce odlišným výsledkům a proto se v různých částech světa používají různé konce, kromě základních obdélníkových. V USA jsou nejoblíbenější šípovité konce, nebo šípovité lichoběžníkové konce se sklopením. V kontinentální Evropě převládá parabolický konec a ve Velké Británii BERP [6].

3.1 Šípovitost (sweep)

3.1.1 Směrem vzad

Jedním z ověřených tvarů je šípovitý konec směřující vzad, který pomáhá snížit aerodynamický odpor konce listu. Tím také pomáhá snížit sílu rázu při transsonických rychlostech konce snížením koncentrace izobar a slabá rázová vlna má tendenci se tvořit až za vnějším rohem listu. Platí vztah, že čím silnější rázy, tím větší hlučnost vrtule. Pro vyšší rychlosti dopředného letu je však zapotřebí alespoň 40° úhel šípovitosti. [6]

Jiná studie [13] použila na listu konec s 30° šípovitostí a sklonem 15° a pozorovali zlepšení aerodynamických vlastností oproti obdélníkovému konci. Obdélníkový konec je sice nejjednodušší, ale v porovnání s šípovitým koncem v dopředném letu se mu nemůže rovnat a zlepšení bude pravděpodobně patrné i s nižším úhlem šípovitosti. Navíc má své příznivé účinky i sklon konce a ty budou popsány v další kapitole.

Z geometrie šípovitého listu lze počítat výsledné Machovo číslo konce jako: $Ma_n = Ma \cdot \cos \lambda$

Kde Ma_n je výsledné číslo konce a Ma je číslo stejného listu, pokud by nebyl šípovitý a λ je úhel šípovitosti. Snížení hodnoty Machova čísla pomocí šípovitosti zmenšuje nežádoucí účinky stlačování vzduchu na konci postupujícího listu a snižuje koeficient odporu a výkon potřebný k překonání povrchového odporu. [5]

Při vyšších rychlostech dopředného letu je u vrtulníků limitujícím faktorem ztráta vztlaku na vracejícím se listu (retreating blade). Ke ztrátě vztlaku dochází kvůli nízké relativní rychlosti listu vůči vzduchu v jeho okolí. Protože se mohou točit za vyšších otáček, umožňují listy s šípovitými konci i větší dopředné rychlosti vrtulníků.

Kromě nižšího potřebného výkonu a odporu může šípovitý konec listu snížit hluk až o 4 dB [14]. V tomto případě se jedná o snižování tonálního hluku a nejvíce nás zajímá první hlavní frekvence, protože bývá nejhlasitější.

Je patrné, že šípovitost přináší řadu výhod, ale má i své nevýhody. Hlavní z nich je posunutí aerodynamického těžiště dozadu a to může způsobovat předozadní naklápění (pitching) listu, které vede ke snížení ovladatelnosti [6]. Také nemá nejlepší vlastnosti při vysokém úhlu náběhu [15]. Na to je mimo jiné potřeba pamatovat při výběru vhodného tvaru profilu listu, protože symetrické

profily bez prohnutí (camber) budou mít při malém úhlu náběhu nízký vztlak a při dopředném letu může nastávat ztráta vztlaku i při nižších rychlostech než jsou u vrtulníků běžné.

Je známo, že šípovitost konce listu způsobuje na vrtuli ohyb a zkrut [16]. Pokud nebude mít rotor kloubovou hlavu, tak budou listy více zatěžovány a přidat šípovitost listů na vrtulník, který byl navržen pro obdélníkové listy může snížit bezpečnost.

3.1.2 Směrem vpřed (forward)

Druhou variantou by byl list s šípovitostí vpřed, který sliboval snížení vibrací a hluku pomocí lepšího rozložení zatížení na list [17]. Vyrovnání aerodynamických a dynamických sil zajišťovala část zahnutá vzad, která byla blíže středu [6]. Vrtule měla být také stabilnější kvůli celkově nižším vibracím. Ukázalo se ale, že hlavní nevýhodou je předčasná separace proudění kvůli velkému gradientu tlaku na špičce listu [6]. Jakmile dojde u listu k separaci proudění, tak nastávají velké vibrace, které se i projeví zvýšením hlučnosti, takže by mohl být používán jen při nízkých Machových číslech. Žádný vrtulník tento typ listů nepoužívá a není důvod proč vytvářet takto komplikované vrtule s minimálním zlepšením oproti standardnímu obdélníkovému listu.

3.1.3 Dvojitá šípovitost

Pro aerodynamickou stabilitu je nutné vyrovnat momenty působící podél rozpětí listu vrtule neboli podle osy natáčení listu (feathering axis). Skvělým způsobem jak toho dosáhnout a zároveň využít šípovitost je dvojitá, případně trojitá šípovitost. Tento způsob ovlivňuje větší plochu listu, část blíže ke středu vrtule je šípovitý směrem dopředu a část blíže konci pak zase směrem vzad. U trojitě šípovitosti má pak úplný konec ještě větší úhel šípovitosti.

Německá studie [18] porovnávající dvojitě šípovitý list a list s parabolickým koncem zjistila, že dvojitá šípovitost listu vytvářela jediný koncový vír a minimalizovala tvorbu dalších indukovaných vírů, které běžně vznikají kolem listu rotoru. Zároveň se část vířivosti přesouvá do středu a pod list do úplavu. Modelová analýza [16] porovnávající list s parabolickým koncem a s dvojitě šípovitým koncem zase dospěla k závěru, že dvojitá šípovitost listu vedla k lehkému snížení potřebného výkonu. Porovnání bylo provedeno při úhlu kolektivu $10,2^\circ$, který zhruba odpovídá podmínkám ve visu.

Jelikož nemají šípovité listy dobré vlastnosti při velkých úhlech náklonu, je otázkou, jestli bude v dopředném letu dvojitá šípovitost lepší než parabolický konec. Je jisté, že bude pro vysoká Machova čísla konců, ale pro nižší rychlosti už to nemusí být tak jasné.

Dvojitě šípovitý list má unikátní jev, který popisuje studie [18], a to 2 fáze ztráty vztlaku. V první fázi se hlavní vír přesune od konce na přední stranu části se zadní šípovitostí. List se sice chová neklidně, ale je stále ještě dost stabilní na fungování v tomto stavu.

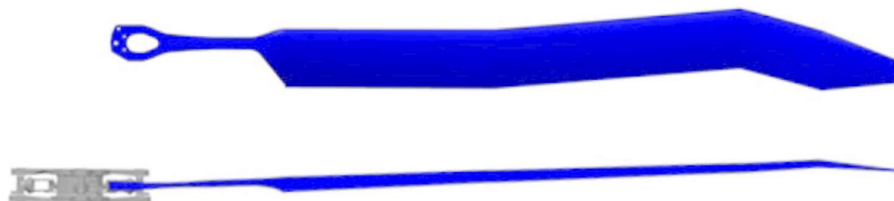
Je velmi důležité navrhnout list se znalostí výsledných aerodynamických sil profilů, protože aerodynamický střed před osou zkrutu je ještě horší než za ní [6].

Výroba aerodynamicky stabilního listu vyžaduje pokročilé materiály, protože mají složité tvary a zároveň jsou na ně kladeny velké pevnostní nároky v kombinaci s co nejmenší hmotností.

Pro dosažení slabých rázových vln při vyšších rychlostech a nízké hmotnosti na konci listu se dá použít šípovitý zužující se konec. Ten navíc pomáhá snížit zatížení a vibrace na táhlech nastavení úhlu náběhu a podle tloušťky profilu konce může také snižovat výkon potřebný k dopřednému letu.[6]

Modelová analýza [16] také porovnávala velikosti výsledných sil působících na šípovité listy a zjistila, že u listu s větším úhlem šípovitosti působí na kořen (blade root) menší zkrutný moment než u listu s menší šípovitostí. Podoba listů je vyobrazena na [obrázku 3](#). Přesné hodnoty jsou 7,5° dopředné, 35° zadní šípovitosti a sklon konce 15° u prvního listu a 5° dopředné, 15° zadní a sklon 5° u druhého listu. Z porovnání vyplývá, že správným nastavením úhlu dvojité šípovitosti listu se dá snížit toto zatížení na minimum. Dalším důvodem kromě správného vyvážení, který není v analýze popsán, by mohl být větší sklon, který pomáhá vyrovnávat aerodynamické síly a momenty.

dvojitě šípovitý list s meššími úhly šípovitosti a menším sklonem



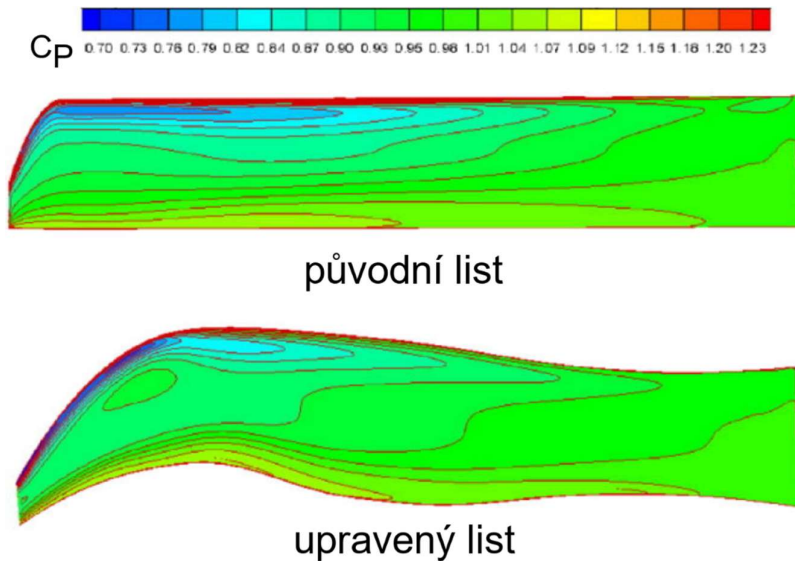
dvojitě šípovitý list s většími úhly šípovitosti a větším sklonem



Obrázek 3: Tvary listů použitých k analýze porovnávající šípovité listy ([16], upraveno)

Analýza dále zjistila, že nevýhodou dvojité šípovitosti je větší moment zpomalování listu (lag) a vlastní frekvence se blíží 7. harmonické frekvenci, takže hrozí rezonance listu [16]. Řešením proti zpomalování by bylo použít kloubovou hlavu rotoru, ale problém s vlastní frekvencí bude vyžadovat změnu tuhosti nebo hmotnosti listu a to může mít další negativní účinky.

Optimální tvar listu, který používá kromě dvojité šípovitosti i lichoběžníkový konec zveřejnil Chinese Journal of Aeronautics. Tato studie [19] se zaměřovala na co nejvyšší hodnotu účinnostní charakteristiky rotoru, protože je zásadní pro porovnání aerodynamické účinnosti ve visu. Podoba listu je na [obrázku 4](#), ale nemá žádný sklon, protože by optimalizace měla příliš variabilních parametrů.

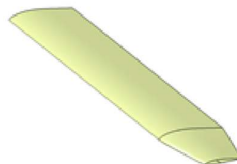


Obrázek 4: Optimalizovaný dvojitě šípovitý list s lichoběžníkovým koncem ([19], upraveno)

Většina testů se a optimalizací se právě provádí pro vis nebo dopředný let, protože se jedná o nejčastější situace, ale v ostatních režimech není chování zcela objasněné. Jedním z problematických režimů může být například sinusoidální změna náběhu, kdy se list zároveň zvedá nahoru a dolů. Již zmiňovaná studie [18] odhalila, že v tomto případě u dvojitě šípovitěho listu dochází ke ztrátě vztlaku iniciující od zadního rohu konce. Ztráta vztlaku se projeví přerušovaným koncovým vírem a chaotickým vířením za listem. Při dopředném letu se náběh listu také pravidelně mění, ale kvůli superpozici vektorů rychlostí je ztráta vztlaku nejpravděpodobnější na ustupujícím listu, proto není zapotřebí kontrolovat jiné oblasti.

3.2 Lichoběžníkový (taper)

Další možnost úpravy konce je udělat konec lichoběžníkový, který se nachází na obrázku 5. Benefitem je snížení potřebného výkonu motoru pro vytváření stejného tahu. Jelikož je tětíva konce kratší, vzniká menší indukovaný odpor. K těmto závěrům se dostaneme porovnáním jejich FoM, protože je nepřímo úměrné počtu listů a střední délce tětivy.



Obrázek 5: List s lichoběžníkovým koncem [20]

Experimentálním měřením listů rotoru u vrtulníku AH-64 Apache bylo zjištěno, že lichoběžníkový konec vedl ke zlepšení FoM o 6,4% vůči základnímu obdélníkovému listu. Také bylo zjištěno, že FoM ve visu je tím větší, čím je začátek blíže středu. [6]

Každá vrtule má nějaký úhel zkroucení listu (twist angle), protože pomáhá k rovnoměrnému zatížení listu. Části vrtule blíže k ose rotace mají nižší obvodovou rychlost, proto se používá zkrut

ke zvýšení jejich úhlu náběhu, který zase vede ke snížení rozdílu vztlaků. Z toho důvodu je také zkroucení listu bráno jako důležitý faktor pro zvyšování efektivity vrtule. Zkroucení listu rotoru však ztrácí efektivity úměrně tomu, čím větší část listu je lichoběžníková, proto se nejčastěji vyskytují pouze lichoběžníkové konce [6].

Optimalizací bylo zjištěno, že nejnižší ztráty indukovaného výkonu u listu s lichoběžníkovým koncem vznikají při použití poměru zúžení 0,4. [5] To znamená, že délka tětivy na konci je 2,5x kratší než je tětiva listu před koncem. Porovnání bylo prováděno za stejné plošné hustoty podle tahu, ale nebylo zmíněno od jaké vzdálenosti poloměru by měl lichoběžníkový konec začít.

Krátká tětiva lichoběžníkových konců má ovšem také nežádoucí efekt a tím je odtržení (separace) proudění a také větší profilový odpor, který je způsobený nízkým Reynoldsovým číslem [20]. Při nízkých Reynoldsových číslech má větší vliv tření obtékajícího vzduchu, které se projeví větším třecím odporem.

Hlavní nevýhody lichoběžníkového konce se však projevují až při vyšších obvodových rychlostech. Je jimi velký odpor, s kterým souvisí snižování účinnosti, a také náchylnost ke ztrátě vztlaku na ustupujícím listu.

Je také možné tyto 2 výše zmíněné tvary propojit a vznikne šípový lichoběžníkový konec. Ten snižuje za vysokých rychlostí zatížení podél osy natáčení listu a vibrace. Na druhou stranu ale zvyšuje hmotnost oproti lichoběžníkovému konci a efektivity s potřebným výkonem záleží na pevnosti, tloušťce, rychlostech a tuhosti zkrutu. Je proto nutné počítat při designování listu se všemi zmíněnými vlastnostmi. [6] U šípovitých lichoběžníkových konců je také důležitá velikost úhlu šípovitosti, protože s malým úhlem nedochází k žádnému zlepšení oproti lichoběžníkovému konci a při větší hodnotě se už může vyplácet dvojitá šípovitost, aby se vyrovnal aerodynamický moment na první čtvrtinu střední tětivy listu.

Lichoběžníkový a kombinovaný konec výrazně snižují rychlost a sílu koncového víru, čímž zmenšují ztráty, číselně jde asi o 30% snížení rychlosti. Sklon listu v tomto případě snižoval rychlost pouze o 20%. Z toho vyplývá, že obdélníkový bude nejhlučnější a list se skloněným koncem bude o trochu méně hlučný. Nejlépe na tom pak bude právě lichoběžníkový a kombinovaný konec. Je také zajímavé, že u lichoběžníkového konce klesnou indukované víry ještě níže pod rovinu vrtule než u dolů skloněného konce. [20]

Přestože má lichoběžníkový konec listu při ideálních podmínkách nejlepší FoM ve visu, s velkým zatížením vrtule se drasticky snižuje [6]. Toto potvrzuje i experimentální měření [20], které přidává, že ani kombinovaný konec nemá tak dobré vlastnosti FoM, jako list se skloněným koncem.

Měření [21] při Machově čísle 0,4 odhalilo problém u lichoběžníkového a kombinovaného konce, kdy nedošlo ke zvýšení efektivity oproti obdélníkovému listu kvůli příliš vysokému zatížení listů. Důvodem pro snížení tahu a horších aerodynamických charakteristik při 16° úhlu náběhu může být předčasné odtržení spodní vrstvy (premature separation) kvůli nízkému Reynoldsovu číslu a moc velkému úhlu náběhu.

3.3 Parabolický

Dalším praktickým tvarem je parabolický konec, vyobrazený na obrázku 6. Zakulacený tvar vytváří ustálenější koncoví vír, takže se dá předpokládat, že bude způsobovat menší odpor. Parabolický konec předčil eliptické a obdélníkové konce podle FoM, prokázal znatelné snížení indukova-

ného výkonu v dopředném letu a zvýšení tahu o 5 % ve visu. Také měl oproti eliptickému a základnímu obdélníkovému listu nižší hluk za všech letových podmínek. [6] Snížení hluku způsobuje pravděpodobně lepší rozklad rychlostí na konci listu, jako je tomu u listu s šípovitostí. Pro nižší rychlosti se také zdá výhodnější než lichoběžníkový konec.



Obrázek 6: Rozložení Ma na parabolickém konci listu ([6], upraveno)

List s parabolickým koncem má s rostoucím zatížením stále stejnou účinnost, na rozdíl od šípovitěho konce, a to téměř až do ztráty vztlaku a navíc se nepotýkal s rizikem ztráty vztlaku při sinusové změně úhlu náběhu, která byla pro dvojitě šípovitý konec problematickým režimem [18].

Za velkých dopředných rychlostí se však už nemůže s šípovitým koncem porovnávat, protože ten lépe odvádí rázové vlny [6].

Již dříve zmiňovaná studie [18] připisuje parabolickému konci větší vířivost koncového víru než dvojitě šípovitému listu. S tím je pak spojen vznik větších koncových vírů s vyšší rychlostí rotace při stejném zatížení a neměnném úhlu náběhu. Důvodem pro větší víry může být prudké stočení konce, zatímco u šípovitěho konce je přední hrana přímá.

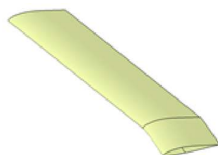
Z pozorování vírů v dopředném letu také vyplývá, že koncové víry parabolického konce se rozpadaly rychle díky interagování koncových vírů různých listů [18].

Zde je také možné konce kombinovat a přidat šípovitost úplného konce listu, který by mohl snížit vířivost a velikost koncových vírů a oddálit kompresibilitu vzduchu při vysoké obvodové rychlosti konce. Takový list vylepšeným sklonem konce snížil potřebný výkon při dopředném letu o 10% v porovnání s běžným obdélníkovým listem a navíc snížil hluk asi o 1dB [22].

Další uplatnění parabolického konce je na listech nazvaných AGB a ATR, které jsou zmíněné v další kapitole.

3.4 Sklon (anhedral)

Ověřeným způsobem, který zlepšuje letové parametry je sklon konce vrtule dolů a je vyobrazen na [obrázku 7](#). Možnost použít sklon u konců byla objevena až v roce 1983 a to už se dělaly pokusy s šípovitými a lichoběžníkovými konci.[23]



Obrázek 7: List se skloněným koncem [20]

Výpočtové simulace předvíдалy, že konec listu s úhlem sklonu(anhedral) 20° bude zlepšovat účinnostní koeficient rotoru asi o 0,02 [6]. Experimentálním měřením pak bylo změřeno zlepšení

účinnostního koeficientu až o 5% při 20°, ale při 45° už je účinnost zase nižší. [24] Dá se tedy předpokládat, že Nejideálnější úhel pro obdélníkový list se sklopeným koncem bude kolem 20°.

Skloněný konec (15°) měl podle měření studie [20] nejvyšší změřenou hodnotu FoM a to 0,67. Oproti základnímu obdélníkovému listu bylo větší o 0,03 a šlo o vyšší hodnotu, než měly kombinované konce. Konkrétně šlo o šípovitý lichoběžníkový a šípovitý lichoběžníkový s mírným sklonem. Porovnávání bylo uskutečněno za rychlosti konce 0,3 Ma. Je pozoruhodné, že v konkrétním případě dokázal skloněný konec předčít vliv lichoběžníkového konce, který mívá skvělé hodnoty FoM. Navíc kombinovaný konec se sklonem měl stejný úhel sklonu, proto je otázkou, jestli by odebrání šípovitosti v tomto případě pomohlo, nebo jestli by se pořadí efektivnosti změnilo při jiném úhlu sklonu. Tento výsledek však není podložený přímým výpočtem, ale měřením vychází u kombinovaných listů snížení (C_D/σ), spojené se zmenšením (C_T/σ), které je výraznější. Výpočty také komplikuje, že závislost FoM na sklopení není monotónní s tím, že se při malých úhlech zmenšuje [13].

Ze studie [20] dále vyplývá, že je skloněný konec efektivnější než lichoběžníkový a kombinovaný konec asi od 16° sklonu a to tím více, čím je vyšší Machovo číslo. Na druhou stranu je do 12° o poznání méně efektivní.

Studie s numerickou simulací íránské univerzity [25] pak uvádí zlepšení FoM díky skloněnému lichoběžníkovému konci oproti základnímu obdélníkovému o 15,09% při 1250 otáčkách a 12,83% při 2540 otáčkách. Jedná se o vysoké otáčky, protože podle autorů odpovídají rychlostem konců 0,44 Ma a 0,89 Ma. Otázkou je, jestli takové zlepšení může správnou geometrií nastat. Na druhou stranu byly všechny vypočítané hodnoty FoM menší než 0,5.

Samotná hodnota FoM není jednoznačná a je zapotřebí porovnat i indukované ztráty, které souvisí s koncovými víry. Studie [20] také porovnávala měřením obdélníkový list, list s lichoběžníkovým koncem, se sklopeným koncem a s kombinovaným koncem, který byl šípovitý, lichoběžníkový a se sklonem. Z nich čistě skloněný konec listu má nejmenší míru cirkulace a to 13% oproti obdélníkovému listu. Z výsledků měření dále vyplývá, že sklon snižuje tečné rychlosti koncového víru o 20% oproti obdélníkovému, ale paradoxně to není tak velké zlepšení, jako u listu s lichoběžníkovým a kombinovaným koncem, které přinesli zlepšení dokonce o 30%. Z těchto výsledků vidíme jak komplikované je vyhodnocování koncových vírů a jejich indukovaných ztrát. Navíc směr, kterým víry postupují, může mít také svůj vliv. Z měření dále vyplývá, že u kombinovaného listu, který má také sklon konce, se indukované víry dostanou ještě níže pod rovinu vrtule než u lichoběžníkového konce [20]. Zároveň vede sklon k nižší síle koncových vírů a nižšímu indukovanému výkonu [24].

Z jiné numerické simulace íránské univerzity [22] je zřejmé, že dolů sklopený konec listu způsobuje pouze malé množství vírů a jejich rychlost proudění je malá. Zlepšení poměru vztlaku ku odporu vzrostlo oproti obdélníkovému o 1,51%. Skloněný konec také snižuje zatížení a ovlivňuje vnější část listu, ale ne tu vnitřní a celkově vede k mírnému snížení tahu [24]. Jiný článek [16] také uznává snížení tahu, ale uvádí, že sklopení konce má malý vliv na celkový tah. Navíc pokud je úhel sklopení konce v porovnání s úhlem šípovitosti malý, ovlivňuje celkovou efektivitu rotoru jen nepatrně. Z těchto závěrů je patrné, že celkový tah rotoru není jediný parametr pro určení efektivnosti, ale záleží i na výsledném indukovaném výkonu.

Jak je patrné z předchozích příkladů, tak sklon konce je většinou vhodný v kombinaci s jinými konci a šípovitý konec není výjimkou. Kompenzuje posunutí působišť sil způsobené zadní šípovitostí a list je pak aerodynamicky stabilnější [15]. Dále snižuje sklopený konec u šípovitého konce listu hodnotu elastického zkrutu listu rotoru podle osy natáčení listu (feathering axis) [16].

Počítačové výpočty [25] také ověřily, přidání sklonu k šípovitému lichoběžníkovému konci zvýší jeho FoM. Nebo zakulacený a sklopený konec, který zvýšil FoM pomocí snížení koncového zatížení listu [26].

Studie Nanjingské univerzity [24] studovala hluk listů se skloněnými konci a uvádí, že hluk použitím sklonu oproti obdélníkovému konci nesnižuje v rovině vrtule, ale až pod ní. Hluk se také snižuje přibližně stejně při použití listů s úhly sklonu konce 20° i 45°. Co ze studie nemůžeme s jistotou vyvodit je to, že se mezi zmíněnými úhly nenachází nějaké výrazné minimum. Dříve citovaná studie [20] se o hluku vyjadřuje tak, že sklon sice sníží hlučnost, ale ne tolik jako lichoběžníkový a kombinovaný. V článku o koncích listů [6] je napsáno, že hluk interakce listu s vírem (BVI noise) byl způsobován dvěma víry od sklopeného konce, které by se odebráním sklopení odstranily.

Při návrhu listu se sklopeným koncem je zapotřebí počítat s vyšším ohybovým namáháním listu [16] a některé simulace naznačují, že sklon konce listu možná nebude mít takový příznivý efekt pro vrtule s velkým poměrem štíhlosti [6].

Moderní přístup je, že mají vrtulníky velké zatížení vrtulí kvůli vyšším otáčkám[23] Proto je sklopený konec čím dál výhodnější a dá se očekávat, že se bude také častěji objevovat.

3.5 Dihedral

List s koncem ohnutým vzhůru(dihedral) vytváří velké množství vírů kolem konce listu a navíc mají velkou rychlost proudění, což znamená velkou ztrátu energie. U listu s koncem ohnutým vzhůru(dihedral) vzrostl koeficient tahu C_T o 5,36%. ale vzrostl i koeficient výkonu C_Q o 6,73%. Výsledkem tedy bylo zhoršení poměru vztlaku ku odporu o 1,09%. [22]

Na špatných aerodynamických vlastnostech se také shoduje studie [25], ale také vyzdvihuje znatelné snížení hlučnosti stejně jako u listu Eagle, který bude analyzován později.

Rozdvojený konec, který má spodní část sklopenou a horní ohnutou vzhůru byl navržen pro studii [22] ve dvou provedeních a to ALD =anhedral large dihedral a AMD =anhedral medium dihedral. ALD byl jak v hlučnosti, tak i poměru vztlaku ku odporu asi o 0,4% horší než základní obdélníkový list. AMD si vedl o trochu lépe, zlepšil poměru vztlaku vůči odporu oproti obdélníkovému listu o 2,56%. Nicméně listy s koncem ohnutým vzhůru nepřinášejí téměř žádné výhody oproti obdélníkovému listu a na žádných rotorech se nepoužívá.

3.6 Tiché konce

Pro snižování hlučnosti je lepší rozdělit koncový vír než zmenšovat velikost jádra víru [23]. Snížit hlučnost pomocí rozdělení a vzájemnému vyrušení vírů se snaží konce v této kapitole. Přestože se nejedná o používané konce, jejich principy mají určitý potenciál.

3.6.1 Vane

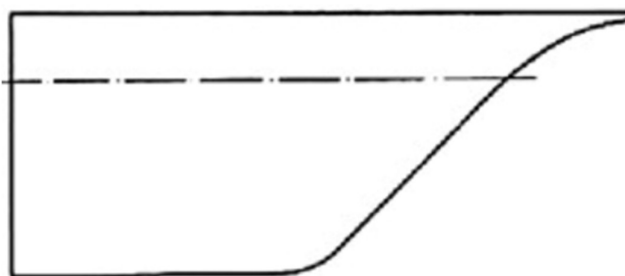
Westland-Vane *tip* má na konci obdélníkového listu menší křídlo, které má odtokovou hranu dříve než list, takže nejsou spojené a vytváří se za nimi 2 koncové víry, které se nespojují ani po delší vzdálenosti. Tímto způsobem se podařilo snížit hluk interakce listu s vírem (BVI) a to vedlo ke snížení hlučnosti o 5,6 dBA.[6]

Nevýhodou je zvýšení potřebného kroutícího momentu o 18% [6]. Vyšší kroutící moment znamená větší motor, nebo u elektromotorů větší spotřebu energie a 18% už je nezanedbatelný rozdíl.

Možná by bylo použitelné, pokud by se vysouvalo až v obydlených oblastech, kde má snížení hlučnosti daleko větší váhu, ale složitější řešení zvýší celkovou hmotnost a navíc na konci listu, kde je nejméně žádaná.

3.6.2 Ogee

Zajímavý je také Ogee *tip*, který byl navržen pro snížení rychlosti koncového víru a tvar listu je na [obrázku 8](#). Snížení rychlostí na špičce zlepší FoM při nízkém tahu, ale může způsobit předčasnou ztrátu vztlaku a zvýšit povrchový odpor. [6] Nedává smysl používat rotory s nízkým tahem, ledaže by se jednalo o velmi lehký bezpilotní stroj s velkou vrtulí, ale oblast využití bude pravděpodobně minimální.



Obrázek 8: Konec listu Ogee [6]

Testy konce Ogee na vrtulníku UH-1 ověřily snížení hlučnosti díky snížení koncentrace víru, ale způsobily také snížení výkonnosti ve visu [27].

Ještě před tím, než se postupový poměr (advance ratio) μ rovnal 0,5 už se na koncích objevovaly lokální hranice stlačitelnosti a Machovo číslo bylo blízko 1 [28]. Z toho vyplývá, že je konec nevhodný pro velké dopředné rychlosti.

Po dalších testech se však už nikde neobjevil.

3.6.3 Canard

Canardův konec jsou 2 křídélka na konci obdélníkového listu. Funkcí křidélek je rozdělit koncový vír a interakcí rozdělených vírů jim snížit rychlost rotace a tím i indukovaný odpor listu.

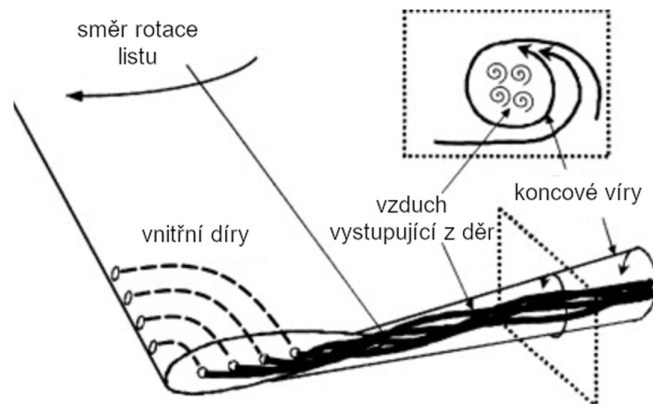
Měření rotoru ve větrném tunelu ukázalo, že neoptimálnější nastavení je -5° úhlu náběhu křidélek oproti úhlu náběhu listu [29]. V měření byl nastaven úhel náběhu rotoru 0° , takže by bylo zapotřebí ověřit funkčnost i pro různé úhly natočení rotoru.

Z testů vyplývalo, že přidáním křidélek se účinnost ve visu téměř nezmění, ale v dopředném letu bude potřebný kroutivý moment na motoru o 1% větší [29]. To se zdá jako dobrý kompromis, ale v porovnání s dalšími konci se nejedná o nic úchvatného. Navíc je kroutivý moment počítán pro ideální podmínky a kdyby se chtělo těchto charakteristik dosáhnout na skutečném vrtulníku, tak by se musela křídélka umět naklápět, aby byla vždy pod ideálním úhlem. Přidání naklápěcích křidélek zvyšuje celkovou složitost a hmotnost na konci listu, která je nežádoucí.

O stejný efekt jako Vane tip se snažilo Sub-Wing a Split tip, ale posunutí druhého víru od listu bylo příliš malé, takže se stejně spojili v jeden [23].

3.6.4 TAMI

Tip Air Mass Injection (TAMI), které jsou na obrázku 9, snižují hlučnost [28]. Odfukování koncového víru dírami v náběžné hraně listu pomáhá rozptýlit a také odsunout koncový vír, čímž může dojít k prodloužení efektivního rozpětí vrtule. Testy ukázaly snížení rychlostí proudění za cenu zvýšení potřebného výkonu o méně než 3%. [6]



Obrázek 9: Princip fungování TAMI ([6], upraveno)

Jejich nevýhodou je nepopíratelně větší profilový odpor, ovšem by se toto zařízení dalo zkombinovat například se sklopeným koncem.

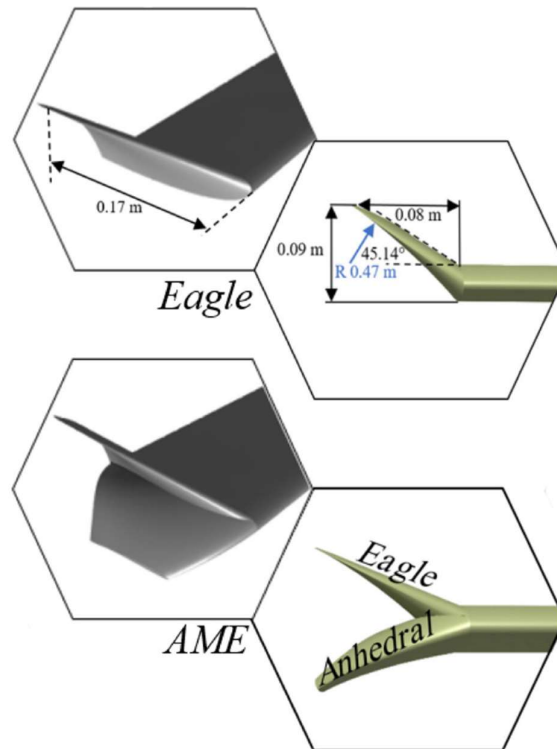
3.7 Eagle

Jedná se o konec listu, který je inspirovaný perutěmi orlů, proto dostal toto jméno.

Již citovaná studie [22] testující různé tvary konců poukázala na skvělé výsledky tohoto typu. Eagle *tip* nejenže tvoří méně vírů s menší rychlostí proudění než obdélníkový list, ale dokonce i při porovnání s ostatními konci listů jako je skloněný konec. Eagle *tip* má hranu konkávního tvaru místo konvexního, jak je to u listů s konci sklopenými a zaoblenými vzhůru, a z toho důvodu snižuje tlak proudění (flow pressure) [25].

Eagle *tip* zvýšil Účinnostní koeficient rotoru (figure of merit) až o 17%, navíc snížil hluk rotoru asi o 4,5%. Pro konec Eagle se koeficient otáčivého momentu listu C_Q snížil o 1,94%, ale poměr vztlaku vůči odporu se také snížil o 0,89% kvůli snížení koeficientu tahu listu C_T . S tímto problémem pomůže přidání dolů sklopené části (anhedral). Výsledný konec byl v této studii nazván AME (anhedral medium eagle) a je podobný wingletům u některých letadel Boeing. Přesněji dojde ke zvýšení poměru vztlaku a odporu o 2,85%, což je nejlepší výsledek ze všech porovnaných konců. [22]

Další studie [25] od stejného autora používající CFD (computational fluid dynamics) měřila vliv různých tvarů konců při 1250 a 2540 otáčkách za minutu a použila konec AME, který už zjednodušeně nazývají Eagle-anhedral. Výsledkem bylo, že Eagle-anhedral zvyšuje koeficient tahu C_T o 4,14% vůči obdélníkovému listu při 1250 otáčkách a 7,64% při 2540 otáčkách. Hodnota FoM byla zvýšena o 17.62% a 21.09%. Jak už bylo napsáno dříve, jedná se o velmi podstatné zlepšení a dokud nebudou výsledky měření na funkčním prototypu, je vhodné brát výsledky s rezervou. Podoba a rozměry použitých konců jsou vyobrazeny na obrázku 10.



Obrázek 10: Konce listů Eagle a AME, nebo také Eagle-anhedral ([22], upraveno)

Samotný Eagle měl také dobré výsledky, hodnota FoM byla při 1250 otáčkách lepší o 17.03% než referenční obdélníkový list a o 16.39% při 2540 otáčkách. Tato studie také potvrzuje, že Eagle má o trochu větší účinnost než Blue Edge, protože Eagle a Eagle-anhedral mají slabší koncové víry. Koeficient výkonu C_Q se snížil o 2.27% a 3.84%. Eagle také lehce předčí Blue-edge ve všech měřených kategoriích. [25] Blue Edge bude popsán v další kapitole, ale jde o pokročilý tvar konce s šípovitostí, díky které se dá předpokládat lepší chování listu za vysokých dopředných rychlostí oproti konci Eagle.

Eagle tip snižoval hlučnost i v rovině vrtule, ale vrtule se skloněným koncem a Eagle-anhedral měly hlučnost podobnou jako obdélníkový list. Porovnáním by se dalo říct, že Eagle-anhedral je efektivnější, ale samotný Eagle je tišší a to až o 4,5%. [25]

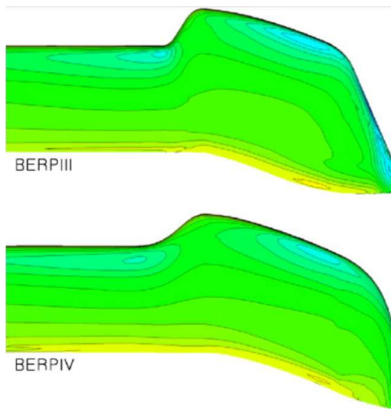
3.8 Speciální konce

Winglety na koncích, podobné jako u letadel, pomáhají prokazatelně pouze při visu[6]. V dopředném letu pak mohou bránit v proudění vzduchu pod konec listu a omezují tak úhel naklonění vrtulníku v dopředném letu, proto se místo nich využívá sklopených konců. Ty dopředný let takto negativně neovlivňují.

3.8.1 BERP

British Experimental Rotor Programme

První z programů, které se zabývali kombinací různých tvarů konců a přinesl několik generací listů vhodných pro velké dopředné rychlosti [6]. Poslední 2 generace listů se nachází na [obrázku 11](#).



Obrázek 11: Rozložení tlaků na listech BERP 3 a BERP 4 [6]

Výrazným rysem konce je výstupek na náběžné hraně pro udržení aerodynamického středu na $\frac{1}{4}$ těživy, který také umožňuje, aby měl vracející se list (retreating blade) větší úhel náběhu a nedocházelo ke ztrátě vztlaku ani při postupovém poměru $\mu=0,5$ [15]. Kromě nápadného rozšíření díky výstupku má také zřetelnou šípovitost. Úhel není po celé délce konce stejný, ale je 30° na začátku konce a 70° na úplném konci [15].

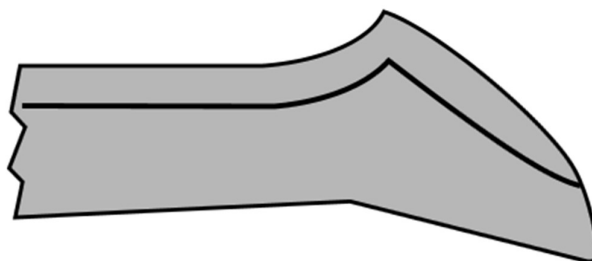
Tento zvláštní design vytváří stabilní vír i při vysokých úhlech náběhu a oddaluje separaci proudění [6]. Separace a ztráta vztlaku byl problém u dvojitě šípovitého konce při vysokých úhlech náběhu, které způsobovali dočasné separace a ztráty vztlaku, které by představovaly vyšší hlučnost a vibrace.

Oproti šípovitému a parabolickému konci snížil hlučnost v okolí, přestože v rovině rotoru měl nejvyšší naměřené hodnoty SPL [13]. Důvodem může být, že hluk se nešíří všemi směry stejně a hluk v rovině rotoru je více utlumený a pro pozorovatele nemá takový vliv.

3.8.2 AGB

ADVANCED GEOMETRY BLADE

Jak je patrné z obrázku 12, jedná se o kombinaci parabolického konce s šípovitým a navíc má výčnělek negující negativní účinky šípovitosti. List se na konci dost zužuje, jako u listů s lichoběžníkovými konci, za účelem minimalizovat zatížení od řízení a zkrut konce [21]. Má mírný sklon špičky konce. Tento konec listu má podobné výhody jako šípovitý list a BERP. Zdroj [30] také uvádí snížení indukovaného výkonu o 3 až 5%.



Obrázek 12: Vzhled AGB [15]

3.8.3 ATR

ADVANCED TECHNOLOGY ROTOR

List s parabolickým koncem a zadní strana se navíc zužuje.

Oproti obdélníkovému se maximální dopředná rychlost zvýší o 17 km/h a potřebný výkon se pro stejně silný motor sníží o 5% [30].

3.8.4 ERATO

Etude d'un Rotor Aéroacoustique Technologiquement Optimisé

Dvojitě šípovitý list – předchůdce Blue-edge

Návrhem listu s 20° šípovitostí od poloměru 0,85 se takto může snížit indukovaný výkon až o 16,5% a Profilové ztráty až o 7,2% při postupovém poměru μ 0,18 [5]. Je zajímavé, že takto výrazní zlepšení nastalo už při docela malém postupovém poměru.

3.8.5 Blue Edge

Blue Edge je efektivní list od firmy Airbus, na kterém je nejvíce nápadná dvojitá šípovitost s lichoběžníkovým a mírně zakulaceným koncem, jak je vidět na [obrázku 13](#). Má stejné výhody jako dvojitě šípovitý list a snižuje rychlost proudění koncových vírů [22]. Blue Edge také zřetelně sníží hlučnost i při vysokých otáčkách a tím i při vysokém Machově čísle, v tomto případě 0,84 Ma [25]. Koncová špička je navíc mírně zahnutá.

Zmiňovaná studie [22], porovnávající listy podle výsledků numerické simulace, označila Blue Edge za nejtišší z porovnávaných listů, dokonce předčily Eagle a všechny kombinace se sklopnými konci, pouze dihedral na tom byl stejně. Ten ovšem není používán kvůli špatné výkonnosti. Na druhou stranu vytváří Blue Edge víry, které se v úplavu víří více než u typu Eagle, to potom způsobuje nižší poměr vztlaku a odporu [22].

Studie [31], popisující přechod z ERATO na Blue Edge, také uvádí snížení hluku interakce listu s vírem (BVI noise) až o 4dB při dopředném klesání. Tento letový režim nastává při přistávání vrtulníku.



Obrázek 13: Konec listu nazývaný Blue Edge [15]

4 Drony

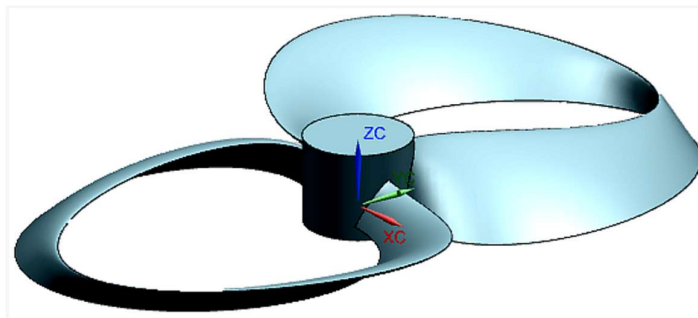
V této části se porovnávají vrtule UAV, které mají kromě menších rozměrů a tím souvisejících Reynoldsových čísel a hmotnosti oproti vrtulníkům také větší zatížení vrtulí. Zatížení je vyšší kvůli vyšším otáčkám a menším rozměrům listů. Dalším významným rozdílem je, že mají listy vrtule pevně spojené bez možnosti jakýchkoliv pohybů vůči sobě.

Významné snížení hluku se dá získat za cenu velmi malého snížení koeficientu výkonu. Optimalizace [32] také naznačuje, že se dá snížit hluk menšími rychlostmi konců listů bez velkého snížení výstupního výkonu.

Je zřetelné, že kvůli interakcím vírů vrtulí kvadrokoptéry v dopředném letu dochází k velkému snížení tahu na koncích listů vrtulí oproti izolovanému rotoru [10]. U helikoptér se nám ovlivňovaly pouze víry listů jednoho rotoru v dopředném letu, ale u dronů a UAM je běžné, že mají vrtulí více, takže výpočty reálného proudění se násobně zesložitují.

4.1 Toroidní vrtule

Mnoho studií se teď zaměřuje na toroidní vrtule, kterou je možné vidět na [obrázku 14](#), od které se očekává snížení hlučnosti kvůli minimalizaci koncových vírů, nebo alespoň snížení jejich síly.



Obrázek 14: 2listá toroidní vrtule [33]

Studie [33] vyzdvihující nadřazenost toroidní vrtule oproti konvenční vrtuli uvádí, že toroidní vrtule dokáže při 3000 otáčkách za minutu vytvářet stejný tah jako vytváří běžná (obdélníková) vrtule při 5000 otáčkách za minutu. Dále se za stejného tahu zvýší C_L toroidní vrtule o 187% oproti základní vrtuli a při tom se hlučnost sníží o 5.2 dBA v radiálním a 19.6 dBA v axiálním směru. dBA udává intenzitu hluku s ohledem na snesitelnost pro lidský sluch.

Tato studie porovnává parametry dvoulistého rotoru vůči toroidnímu rotoru se dvěma smyčkami. Každá smyčka toroidního rotoru se však více podobá dvěma listům se spojenými konci než jednomu listu. Z toho důvodu vychází tak skvělé vlastnosti toroidního rotoru.

Pro posuzování vlastností vrtulí s rozdílným indukovaným výkonem (odpor vrtule se otáčet) je zapotřebí brát v potaz i vlastnosti motoru, protože pro silný motor nebude problém udržet požadované otáčky i přes velký indukovaný výkon, ale slabý motor v kombinaci s aerodynamicky složitou vrtulí by mohl být ve výsledku méně účinný, přestože testy prokáží lepší vlastnosti. Když nahradíme 2listou vrtuli ze zmiňované studie za 4listou, můžeme očekávat stejný tah už kolem 2700 otáček za minutu (lehce vyšší než 2500). Tím pádem změna standardní vrtule za toroidní bude mít za následek snížení tahu.

Důležité je také porovnávat vrtule stejných drsností, protože drsnost povrchu ovlivňuje výsledný tah a hlavně profilový odpor.

Toroidní vrtule se také používá u lodí, které tedy nejsou oblastí této práce, ale výsledky optimalizace jedné studie korespondují s předpokládaným chováním na vzduchu. Tím je, že zvýšení počtu smyček zvýší koeficient tahu C_T , ale nemá velký vliv na výslednou efektivitu. Dále snižování úhlu náběhu zvyšuje efektivitu listu při nižším postupovém poměru než je 0,7, ale pokud je postupový poměr vyšší než tato hodnota, pak je neefektivnějším úhlem 45° . [34]

Vidíme z toho, že dopředný let značně komplikuje výpočty a výsledné účinnosti za různých letových podmínek.

Výhodou toroidní vrtule je snížení první vlastní frekvence koncového víru [33]. Jelikož je lidský sluch náchylnější na vyšší frekvence, vnímaná hlučnost se jeví nižší, přestože je intenzita hluku v dBA stejná.

Studie [8; 33] se shodují na tom, že největší vliv na výslednou hlučnost mají právě vysoké otáčky. Správnou cestou pro snížení hluku dronů bude tedy spíše zvyšování počtu listů na rotoru, které nám umožní snížit otáčky bez velké ztráty vztlaku. Toto řešení bude ještě rozebíráno v další kapitole.

Studie Stockholmské univerzity [35] porovnávají toroidní vrtule o různém počtu listů a také 2 listé konvenční vrtule. Vrtule byly testovány za podobných otáček, které byly dost vysoké. Nejlepší tah měla jednoznačně standardní konvenční vrtule. Litá toroidní vrtule měla oproti standardní nižší hlučnost, ale otázkou je, zda by nebyla konvenční vrtule stejně hlasitá při nižších otáčkách a při tom neměla navíc stále vyšší tah. Samotná tabulka 1 vyzdvihuje důležitost snížit drsnost vrtulí, protože lité vrtule (injection mold) budou mít daleko lepší povrch než 3D tištěné (3D Resin Printer). Je možné také předpokládat, že lité vrtule budou mít i větší pevnost a budou méně náchylné k únavovému zlomu.

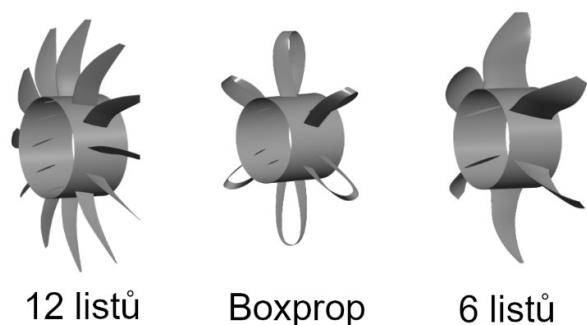
Tabulka 1: Charakteristiky vrtulí podle typu a procesu výroby ([35], upraveno)

Typ vrtule	Proces výroby	Tah T (N)	Nejvyšší dB	Otáčky (min^{-1})
2listá standardní	Litá	2,4	70	10529
2listá standardní	3D tištěná	0,339	66	10028
2listá toroidní	Litá	1,79	63	10236
2listá toroidní	3D tištěná	1,67	80	9750
3listá toroidní	3D tištěná	1,39	83	10137
4listá toroidní	3D tištěná	1,39	84,5	10104

Zajímavé je, že přidávání smyček už u toroidních vrtulí nezvyšuje jejich tah, protože je proudění na listech už pravděpodobně příliš ovlivněné ostatními listy. Z výsledků vyplývá komplexnost proudění podél toroidní vrtule, která ztěžuje její optimalizaci.

Jiná studie [36] zabývající se boxprop, což je vrtule inspirovaná krabicovými křídly a stejně jako toroidní vrtule má místo listů smyčky, porovnává efektivitu s konvenční vrtulí. Velmi vhodně zde používají vrtuli se stejným a dvojnásobným počtem listů, jako je smyček, protože je každá smyčka podobná 2 spojeným listům.

Boxprop je popsán 32 proměnnými parametry, konvenční vrtule je popsána 20 proměnnými [36]. Jedná se tedy o vrtuli složitou na designování a optimalizaci. Podoba boxpropu je vyobrazena na [obrázku 15](#), společně s porovnávanými vrtulemi.



Obrázek 15: Boxprop a měřené vrtule ([36], upraveno)

Účinnost boxprop vrtule, která má 6 smyček je lehce účinnější než 6listé vrtule, ale méně účinná oproti 12listé. Vírová ztráta výkonu je 8.53% pro 6listou vrtuli, 7.81% pro Boxprop a 7.36% pro 12listou vrtuli. [36] Autor článku připouští, že tato konkrétní boxprop vrtule nemusí být ta nejoptimálnější, protože jak už bylo zmíněno, jedná se o velmi složitou vrtuli na optimalizaci.

Na konci boxpropu se vytváří méně tahu, kvůli zakřivení konce a úplný konec je paralelně se směrem tahu, takže nevytváří vztakovou sílu [36]. Tím pádem je materiál spojující obě části nevyužitá hmotnost a té se u dronů a obecně všech letadel snažíme vyvarovat za každou cenu, protože zvyšuje spotřebu paliva a snižuje nákladovou hmotnost.

U kořene listu je oblast nízkého vztaku vůči odporu, protože se listy ovlivňují a zadní list má snížený vztlak, ale přední ho má zase vyšší. Spojené listy u boxpropu musí být dále za sebou, aby se oblast nízkého tlaku mohla volně rozvíjet do prostoru a neovlivňovala druhý list. [36] Stejně problémy se musí řešit i při návrhu toroidní vrtule, protože jsou listy ve smyčkách blíže u sebe než u 2listé vrtule.

Změna úhlu náběhu zadního listu má mnohem větší efekt na výkonnosti předního listu než naopak. Nemá proto smysl nastavovat úhel náběhu zadního listu pro největší vztlak, když je výsledkem ztráta vztaku na předním listu, dokonce větší než získaný vztlak na zadním. [36] Tento poznatek znovu poukazuje na komplikace spojené s návrhem boxpropu a přeneseně i toroidní a nekonvenční vrtule s větším počtem listů.

Obecně způsobuje 6listá vrtule větší hluk než boxprop i 12listá, která je nejtišší. Rozdíl hluku mezi 6 a 12listou vrtulí byl asi 4 dBA. Na druhou stranu má 6listá největší kroutící moment. [36]

4.2 Počet listů

S efektivností vrtule a jejím hlukem také souvisí jaký má počet listů na rotoru. Pokud potřebujeme zvýšit tah vrtule, můžeme místo prodloužení vrtule přidat další listy. Oboje nám sice zvýší její indukovaný výkon způsobený větším odporem listů, ale zatížení se rozloží na více listů a jejich konce budou mít nižší obvodovou rychlost. Snížení hluku větším počtem listů bylo ve studii [8] dosaženo pro rychlosti konců od Machových čísel 0,1 až po 0,25, tedy v celém pásmu, které bylo testováno.

5listá vrtule výrazně snižuje širokopásmovou hlučnost (broadband noise), za stejného tahu a při stejných podmínkách, oproti méně listé vrtuli. Za daného tahu se také snižuje úroveň hluku se zvyšujícím se rozpětím a počtem listů. [8] Nemůžeme však navyšovat počet listů neomezeně, protože se pak začnou listy příliš ovlivňovat a proudění kolem nich začne být chaotické.

Maximální počet listů na vrtuli je dán mnoha faktory, včetně výkonu a kroutícího momentu hnacího motoru [8] a dále limitem listů, které je možné připevnit k centrální části vrtule. V poslední řadě také nesmíme zapomínat na zvýšení hmotnosti v poměru ke snižující se efektivnosti listu.

Navýšení rychlosti vstupujícího proudu vede jak ke zvýšení širokopásmového, tak i harmonického hluku [37]. Studie [38] pak dále řeší rovnováhu mezi harmonickým a širokopásmovým hlukem vrtulí s různým počtem listů. Závěrem je, že zásadní příspěvek na produkovaném hluku pro mnoholistou vrtuli je širokopásmový hluk a harmonický hluk pro vrtule s malým počtem listů.

Ke snižování hluku může kromě vyššího počtu kratších listů také pomoci jejich nepravidelné rozložení, protože jejich frekvence nebudou sladěné [39]. Nevýhodou však budou vyšší vibrace, takže jejich rozmístění nemůže být nepravidelné příliš.

4.3 Přírodou inspirované vrtule

Skvělou inspirací pro vývoj dronů se zdá i sledování přírody.

Studie university v Baltimore [40] porovnávala letové vlastnosti komárů a mušek. Mušky mají více jak třikrát nižší frekvenci mávání než komáři a přesto mají větší střední hodnotu vztlaku.

Je logické, že větší křídlo vytváří za stejných otáček větší vztlak. Když se nastaví rychlosti, aby listy vytvářely stejný tah, tak má obdélníkový list s nejmenší plochou největší úhlovou rychlost a to způsobuje největší širokopásmový hluk [40].

Výsledky také ukazují, že je důležité najít optimální úhel náběhu list, protože při úhlu 45° byl koeficient vztlaku C_L u všech listů stejný a zvětšení plochy listů snižovalo hluk. Hluk se snížil i při úhlech náběhu 20° , ale koeficient vztlaku s rostoucí plochou vrtule klesal. Přesto měla vrtule inspirovaná křídlem mušky s největší testovanou plochou nejlepší výkonnost ze všech 4 porovnávaných vrtulí se 26% zvýšením specifického aerodynamického výkonu (specific aerodynamic power), výkonu potřebného na vytvoření jednotku vztlaku.

Zároveň také snížila specifickou intenzitu hluku (specific sound intensity), hluku potřebného na vytvoření jednotky vztlaku, o 55%. Přestože se zvětšením plochy listu snížil koeficient vztlaku C_L , snížil se i odpor, protože otáčky velkého listu byly v obou případech menší než u úzkého listu. Lze tedy předpokládat kromě snížení hluku i snížení indukovaného výkonu. [40]

Menší indukovaný výkon snižuje nároky na motor, jak už bylo zmíněno dříve, takže se může celý dron odlehčit.

Výpočty byly prováděny pro úhly náběhu 20° a 45° . Při větším úhlu náběhu je však už proudění kolem listu velmi separované a méně citlivé na jeho tvar, ale pro menší úhel náběhu jsou obtékání a s ním související aerodynamické síly naopak citlivější na tvar listu. [40] Je zapotřebí provést více výpočtů s různými úhly náběhu, ale dá se předpokládat, že zvyšování úhlu nad 45° povede pouze k větší separaci proudění a nejzajímavější výsledky budou mezi 45° a 20° .

Dalším směrem bioniky vrtulí dronů je napodobování přírodních tvarů, hlavní inspirací je křídélko semínka javoru a křídlo cikády. Výsledný tvar vrtule se nachází na [obrázku 16](#).



Obrázek 16: Tvar vrtule inspirovaný křídlem cikády a semínkem javoru ([9], upraveno)

V porovnání se standardní vrtulí dokáže přírodou inspirovaná vrtule vytvořit větší tah a dokonce je při tom její rychlost rotace o 3,4 Hz nižší. Také koeficient tahu C_T je u přírodou inspirovaného listu vrtule větší a přitom má nižší sílu tónového hluku. [9] Tonální hluk je přímo úměrný rychlosti rotace, takže je velmi žádoucí snižovat otáčky rotoru pro snížení hlučnosti dronů.

Studie americké univerzity [9] objasňuje rozdíly v proudění, které má za následek zvýšení účinnosti. Bio-inspirovaná vrtule produkuje větší indukovanou rychlost proudění mezi 0,5 a 0,75 rozpětí, protože má v této oblasti delší tětivu(chord). Na druhou stranu má menší indukovanou rychlost od poloviny listu ke středu vrtule a to proto, že zde má tětivu kratší. V porovnání s obdélníkovou má inspirovaná vrtule větší gradient rychlosti od přechodové čáry směrem k ose rotace vrtule. Přestože měly porovnávané vrtule jiné rozložení rychlostí, celkové hmotnostní obtékání za daný čas bylo stejné. Aby bylo možné vrtule mezi sebou porovnávat, tak musí vytvářet stejný tah a to i potvrzuje, že hmotnostní obtékání v daném čase bude stejné, jinak by byl tah obou vrtulí jiný.

Gradient rychlosti základní vrtule podél rozpětí byl malý a proto byly víry za listem téměř paralelní k rovině rotace, zatímco u inspirované vrtule se víry v úplavu naklápěly směrem ven, když postupovaly dolů pod vrtulí. Dále měla inspirovaná vrtule větší indukované rychlosti ve vnější oblasti indukovaného proudění a menší ve vnitřní oblasti. [9]

Také víření inspirovaného listu bylo více chaotické než u základní vrtule. Koncové víry spolu začaly interagovat už po době otočení o 700° , ale u základní vrtule tento jev nastal až po 800° . To mělo za následek, že se koncové víry u bio vrtule rychleji rozpadly. [9] Z porovnávání efektivnosti tedy můžeme předpokládat, že celková indukovaná energie vírů u bio inspirovaných listů byla nižší.

List inspirované vrtule měl téměř konstantní úhel náběhu podél celého rozpětí a to kolem 6° a kvůli malé délce tětivy na konci listu měl menší úhel náběhu než základní obdélníková vrtule [9]. Zkracování délky tětivy na konci listu pomáhá k vyšší hodnotě FoM, které je důležitým porovnávacím parametrem u vrtulníků.

Měření hluku dokázalo, že přírodou inspirovaná vrtule je pro letový režim ve visu tišší než základní vrtule až o 4 dB a dá se předpokládat, že bude tišší i pro ostatní letové režimy [9].

4.4 Šípovitý list dronu

Studie [10] zaměřující se na optimalizaci celé vrtule pro kvadropoptéru, která bude vytvářet co nejnižší hluk, vybrala dopřednou 40° šípovitost s mírně prodlouženou třetivou konce vrtule jako nejvýhodnější. Důvodem je snížení 3. harmonické frekvenci (BPF) o asi 3,5 dB. Zároveň intenzita ostatních frekvencí nebude negativně ovlivněná a celkový vztlak poklesne pouze na 92,1% oproti základnímu tvaru vrtule. Tato ztráta vztlaku je způsobená nižší hodnotou FoM, kvůli delší třetivě koncového profilu. Tento problém by například řešil lichoběžníkový konec.

Autoři dále uvádí, že se změnou otáček jednotlivých vrtulí, která je běžně potřebná pro stabilizování kvadrokoptéry, se mohou i zásadně změnit podmínky a zcela minimalizovat příznivý efekt listů [10]. Tento příklad krásně ilustruje složitost výpočtů proudění kolem UAV s více vrtulemi a zároveň ukazuje, že prvky používané na listech rotorů vrtulníků mohou fungovat i na dronech, ale jiným způsobem.

4.5 Ducted fan

V druhé polovině 20. století se začalo experimentovat s *ducted fan* a vzniklo několik futuristicky vypadajících prototypů, které se ovšem nikdy nedostali do výroby, protože *duct* způsobuje mnoho komplikací při různých letových režimech a především při přechodu mezi nimi. Výhody oproti standardní otevřené vrtuli, ale i zmíněné komplikace použití budou rozebrány v této kapitole.

Hlavní výhodou *duct* je zlepšení letových vlastností ve visu. *Ducted fan*, vytvářející stejný tah jako vrtule nekrytá, vyžaduje podle výpočtové studie o 10% méně kroutícího momentu a je proto více efektivní. [41]

Koeficient výkonu C_Q je pro vrtuli v *duct* nižší než pro otevřený rotor, z čehož vyplývá že je *duct fan* efektivnější. Přestože se tah vrtule uvnitř o trohu sníží, výsledný tah celého *duct fan* je větší díky přidané hodnotě tahu *duct*. [42]

Duct vytváří tah díky svému zužujícímu se tvaru a to hlavně v přední části, kde proudící vzduch konverguje a během proudění se snižuje jeho tlak, který dále podporuje nasávání okolního vzduchu. Tento podtlak se navenek projeví jako přídatný tah. Vznik podtlaku se dá ověřit pomocí Bernoulliho rovnice.

Příspěvek tahu od duct ve visu má i své limity, protože je největší při nulové vertikální rychlosti a se zápornou i kladnou rychlostí klesá [43]. Jinými slovy, tah od duct klesá s rostoucím postupovým poměrem (*advance ratio*) a při hodnotě $\mu > 0,35$ už má záporné hodnoty [42]. To v podstatě znamená, že *Ducted fan* vytváří při větším postupovém poměru více odporu než tahu, je ale zajímavé, že experiment ukazuje větší účinnost než výpočet, jak je vidět z tabulky 2 [41]. Celkové FoM celého systému je díky tahu od *duct* větší než u otevřené vrtule stejné velikosti. Nelze však počítat pomocí stejného vzorce, jako u vrtulníků.

Tabulka 2: Aerodynamické zatížení experimentu v porovnání s výpočtem ([41], upraveno)

Aerodynamické zatížení	experiment	příspěvek	Výpočet	příspěvek
celkem	1,40	100%	1,396	100%
Vrtule	1,00	71,4%	0,985	70,6%
duct	0,40	28,5%	0,410	29,4%
Celková účinnost η	0,713	-	0,687	-

Zvýšení rychlosti rotace vrtule navýší výsledný tah systému kvadraticky. Svůj podíl na tom má i navýšení podtlaku na přední části. Se zvyšujícími otáčkami se ovšem efektivnost pohonu snižuje. [44]

Jiný článek [35] udává výsledný tah *ducted fan* při ideálních podmínkách 2x větší než u otevřené vrtule. Dále uvádí, že *ducted fan* také umožňuje výrazně snížit poloměr vnitřní vrtule pro stejný vztlak při svislém vzletu až o 40%, protože část vztlaku přidává *duct*.

4.5.1 Indukovaný výkon

Důležitým parametrem pro určování efektivnosti vrtule je indukovaný výkon koncového víru, který má často velký podíl na celkových ztrátách a čím vyšší výkon je, tím větší a těžší motor musí vrtuli pohánět, proto se snažíme potřebný kroutící moment minimalizovat.

Z počítačové simulace [45], sledující koncové víry a porovnávající vrtule se stejným koeficientem tahu C_T , bylo zjištěno, že *ducted fan* způsobuje rozklad a chaotické smíchávání koncových vírů v úplavu do doby otočení rotoru o 180°, zatímco víry na odtokové hraně si zachovávají svůj tvar. U otevřené vrtule se koncové víry nemění až po 540° natočení.

Tato studie nevyvozuje žádný závěr ohledně zvýšení nebo snížení indukovaných ztrát pro *ducted fan* vůči otevřené vrtuli. Důvodem je zřejmě to, že *duct* způsobuje víření s větší rychlostí, takže vyšší kinetickou energií, ale zase se rychleji rozpadají a proto mají nižší ztrátový potenciál.

Koncové víry interagují s *duct* a ztratí stabilitu nebo se rovnou za koncem listu rozdělí do malých vírů s velkým vířením. To pravděpodobně ovlivní indukovanou rychlost za koncem listu, která ovlivňuje indukované ztráty pro konec listu. Změna efektivnosti bude tím větší, čím je větší podíl indukovaných ztrát z celkových aerodynamických ztrát. [45]

4.5.2 hlučnost

Další výhodou je nižší hlučnost. Je jasné, že v radiálním směru je hluk vrtule nižší díky *duct*, který funguje jako hluková izolace.

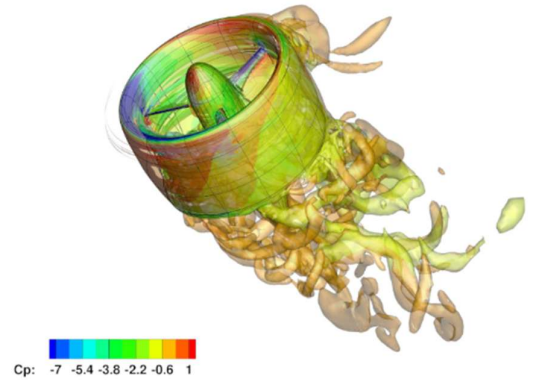
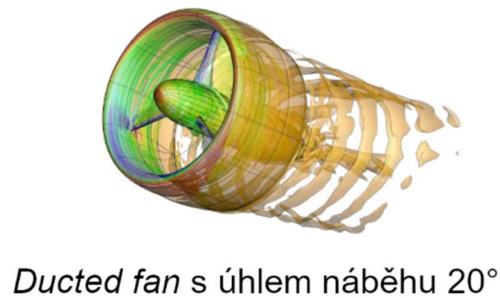
Již zmiňovaná studie se simulací [45] uvádí, že hluk závislý na rychlosti rotoru je ještě významnější než hluk od zatížení rotoru. Motor a vrtule jsou zodpovědné za téměř všechny vysoké frekvence ve spektru hluku. Celkový hluk je však stejný u *ducted fan* i u otevřené vrtule.

Je možné předpokládat, že hluk *ducted fan* se bude s rostoucí vzdáleností snižovat rychleji, protože se i jeho koncové víry rozpadají rychleji. Hluk se také nebude šířit do všech stran stejně, protože *duct* může fungovat v některém směru jako clona a naopak některé vlny hluku směřovat na delší vzdálenosti. Tímto způsobem funguje přenos hluku od odhlučňovaných dálnic.

4.5.3 komplikace

Situaci ve visu komplikuje, pokud vane vítr (cross-wind) a natáčí výsledný vektor vzduchu proudícího do *ducted fan*.

Pro vznik statického tahu od *duct* nesmí docházet k separaci proudění na jeho náběžné hraně [43]. Studie university Glasgow [46] zanalyzovala, že v konkrétním případě byl maximální úhel natočení 23°, kdy už došlo ke ztrátě vztlaku. Jako limitující úhel uvádí 20°, kdy je vztlak od *duct* poloviční a tah vnitřní vrtule ještě není ovlivněn příliš. Už se ale projevuje naklápěcí moment, který otáčí otvor *duct* směrem vzhůru. Na obrázku 17 je patrná změna rozložení tlaku při náklonu *Ducted fan*.

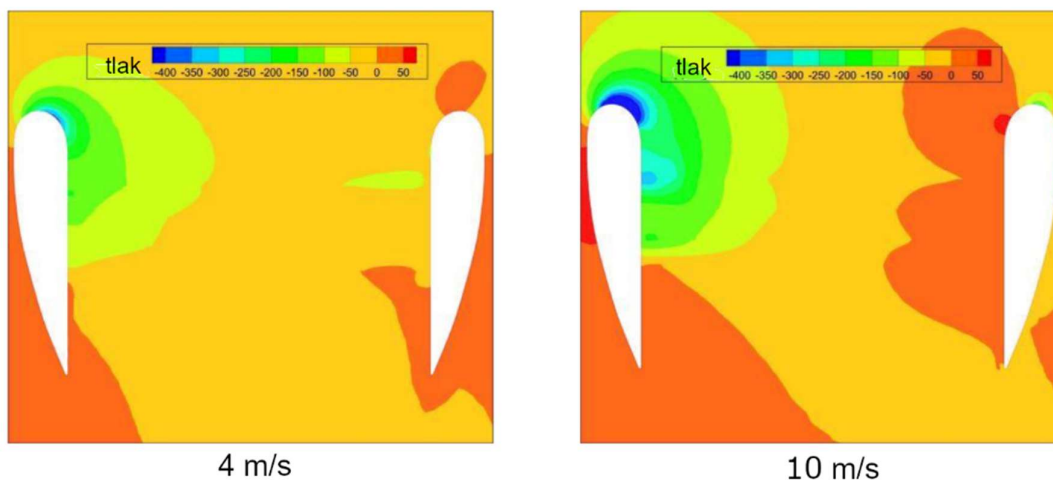


Obrázek 17: Rozložení tlaku C_p podle úhlu náběhu *Ducted fan* ([34], upraveno)

Stejně komplikace doprovází dopředný let, protože už dochází ke změně směru a s tím je spojené rozložení tahu a vztlaku. Pro pohyb v tíhovém poli musí být dron nebo vrtulník neustále schopný vytvářet vztlak odpovídající vlastní tíze. Z toho důvodu nelze natočit *ducted fan* paralelně ke směru pohybu.

Vzduch obtékající *duct* vyvolává vztlak stejně jako křídlo letadla, ale zároveň přichází o část svého původního tahu a vzniká i odpor [41]. Ze simulace [46], uvažující tento stav, vyplývá, že *duct* přispívá více ke vztlaku než k tahu a vrtule je nerovnoměrně zatížená. Na druhou stranu je vztlak stále 3x větší než u vrtule bez *duct*, pokud by byla nakloněná pod stejným úhlem. Poměr výsledné síly *ducted fan* je 2/3 vztlak a 1/3 tah pro náklon 20°.

Závěr článku od autora z univerzity v Nanjing [37] byla maximální dopředná rychlost dronu 3 m/s při otáčkách $\omega = 2600$ za minutu a úhlu náběhu 47°. Rozměry pozorovaného dronu byly stejné jako u studie [44], z které byl použit obrázek, a to průměr *duct* 0,4m. I tato studie také uvádí nevyšší možnou dopřednou rychlost 3 m/s. Tento limit je daný tím, že *Ducted fan* se chce díky momentu rozdílných tlaků na náběžné hraně *duct* natočit směrem k proudícímu vzduchu a to brání nejen při přechodu mezi letovými stavy, ale také při dopředném letu [43]. Velikost rozdílných tlaků při různých rychlostech je patrný z obrázku 18.



Obrázek 18: Rozložení tlaků při dopředné rychlosti 4 a 10 m/s ([44], upraveno)

Vyvažující moment je možný vytvořit pomocí změny směru proudění vzduchu vystupujícího z *ducted fan*. Možností, jak směr upravit a zároveň neovlivnit výsledný odpor, je přidat za rovinou vrtule klapku[43]. Klapka by také mohla pomoci s ovládním stroje, ale bude určitě snižovat celkovou efektivnost.

Ducted fan může být i špatně navrhnutý pro jiná Reynoldsova čísla než v jakých bude dron používán. Špatný profil *duct* bude mít nízký příspěvek tahu. Symetrický profil má za nízkých Re čísel špatné vlastnosti a zakřivený profil (camber) může u *duct*, který je vlastně kruhové křídlo, snížit efektivnost, když bude vnitřní strana *duct* v převráceném režimu a její úhly náběhu budou kladné. [44]

4.5.4 Volba parametrů

Pro dopředný let by měl být *ducted fan* co nejtenčí, kvůli snížení odporu. Na podmínky ve visu přitom zúžení téměř nemá vliv. Pro vis je pak výhodnější větší a předsunutější *duct*. Opačné rozložení je pak výhodnější pro dopředný let. [40]

Snižování výšky duct vede ke zvyšování tahu vrtule uvnitř, ale logicky také ke ztrátě tahu od duct [43]. Má to svá omezení, protože se vrtule nemůže nacházet příliš blízko konců, jinak *duct* ztratí své příznivé vlastnosti a bude zbytečný. Aerodynamické vlastnosti v obou režimech jsou nejlepší, pokud je úhel zužování duct 4°. [40]

Pro výběr vrtule do *ducted fan* platí, že větší štíhlost a menší zkrut vrtule zvýší FoM a je lepší pro vis. Pro dopředný let je pak výhodnější nižší štíhlost a větší zkrut listů vrtule. Pro oba režimy je nejlepší použít 4listé vrtule. [40]

Z výsledku studie vyplynulo, že se *duct* vyplatí do přidání hmotnosti 15% [35].

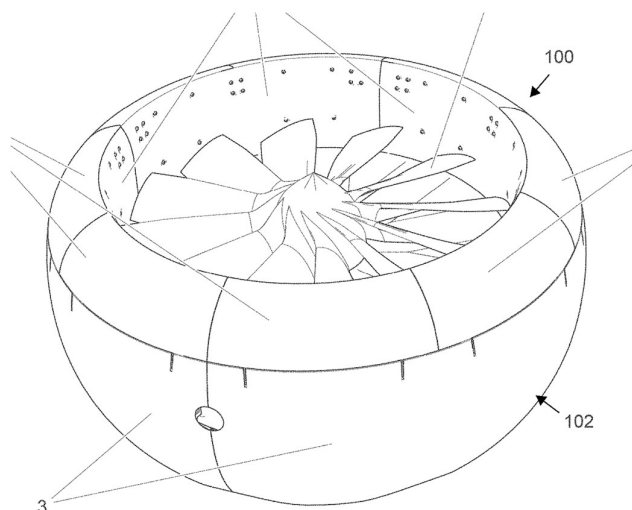
5 UAM

5.1 UAM s ducted fan

Velké množství eVTOL konceptů, spadajících do kategorie UAM, používá otevřené vrtule, ale některé využívají nebo využívaly *ducted fan* různých podob. Jedním z příkladů byl Bell Nexus 6HX, který ale po převedení vývoje pod společnost Textron také přešel na otevřené vrtule. Jejich odůvodněním je, že *ducted fan* vyžadují vyšší výkon motoru [47].

První generaci eVTOL od firmy Airbus měly pohánět 4 dvouvrtulové *ducted fan*, ale už v roce 2021 se rozhodli o otevřené vrtule, protože byly vhodnější ke křídlům, které s novou generací přidali [48]. Křídla mají výhodu úspory paliva, protože za dopředného letu vytváří vztlak a dopředný let zabírá převážnou většinu letu.

Dalším inovativním konceptem je eVTOL společnosti Xagon solutions, který využívá adaptivních *ducted fan*, které mohou měnit objem nasávaného vzduchu pomocí změny geometrie *duct* [49]. Na první pohled je z [obrázku 19](#) zřejmé, že bude *duct* vytvářet znatelný odpor i při dopředném letu, protože se nedá zmenšit tloušťka stěny *duct*. Stroj velmi pravděpodobně letuschopný bude, ale je otázka, jestli bude lepší než UAM s otevřenými vrtulemi.



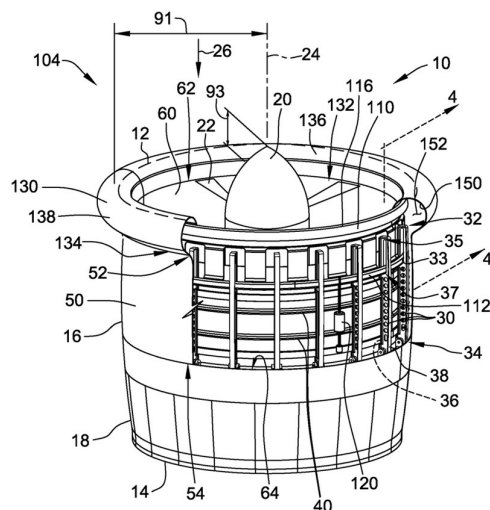
Obrázek 19: Patentovaný ducted fan společnosti Xagon solutions [49]

Jinou podobu stroje s *ducted fan* navrhla německá firma Lilium pojmenované podle německého průkopníka avioniky, Lilienthala. Jejich koncept Lilium Jet [50] se více podobá letadlu než ostatní eVTOL stroje.

Prototyp už zvládl letové testy a ověřil funkčnost větší části zařízení. I přes tyto úspěchy se firmě nedařilo dosáhnout předem daným slíbeným parametrům stroje, docházely prostředky a německá vláda neposkytla financování. Firma se proto v nedávné době dostala do insolvence a práce na prototypu se zastavily. [51]

Inovativním nápadem je také patentované zařízení od firmy Boeing, který je na [obrázku 20](#), umožňující ovládat velikost přední části *duct* a tím měnit optimální tvar pro horizontální nebo

vertikální let [52]. Spojení možnosti zmenšit tloušťku a zároveň délku by mohlo odstranit zásadní nevýhody *ducted fan*, ale oba patenty využívají odlišných technologií, které nejsou kompatibilní.



Obrázek 20: Ducted fan s nastavitelnou velikostí přední části [52]

5.2 UAM s otevřenými vrtulemi

Koncepty letadel eVTOL Joby [53], který je na obrázku 21, i Midnight od firmy Archer [54] používají na lisech sklopení konce zároveň s parabolickým zakřivením. Díky poměrně širokým listům a vyššímu počtu listů na rotoru, přesněji 5, mohou snížit rozpětí listu vrtule při potřebném tahu pro vertikální let. Dalším vylepšením pro snížení hluku je lehce nerovnoměrné rozložení listů vrtule, které pomáhá rozložit hlavní frekvenci mezi širší pásmo frekvencí, ale zároveň tím sníží hluk.



Obrázek 21: Prototyp UAM od společnosti Joby [53]

Joby také uvádí, že odladili vrtuli pomocí počítačové simulace a jejich vybraný tvar má sklopený mírně lichoběžníkový konec s parabolicky zakřivenou hranou. Je jisté, že se inspirovali používanými konci u vrtulníků, protože mají podobný charakter.

Vertical aerospace VX4 [55] i Joby JAS4-2 [56] měly nehodu kvůli nevyváženému zatížení listu rotoru. Před havárií neměla letadla sklopení konců, ale po haváriích byly přidány. Z těchto 2 příkladů je také jasné, že sklopení konců slouží i ke stabilizaci aerodynamických sil

6 Zhodnocení

Listy rotorů vrtulníků a UAV byly v této práci porovnávány zvláště kvůli mnoha odlišnostem a ani se běžně nesrovnávají. Zato rozdíl mezi vrtulníky a UAM už tak velký není, ale zato výzkum kolem UAM je zatím velmi různorodý a nekoherentní. Konkrétní poznatky z letových testů jsou stále firemním tajemstvím, kvůli velké rivalitě. U vrtulníků už je situace trochu jiná, protože za sebou mají téměř století postupného vývoje, přestože tvary listů byly dlouhou dobu pouze obdélníkové.

Problémem při porovnávání také je, že mnoho poznatků za návrhy nejpokročilejších tvarů listů a vrtulí není běžně dostupných, nebo se ve studii prezentuje až pouze výsledek optimalizace, který třeba některé parametry vynechává. Příkladem může být optimalizovaný list podobný ERATO, ale neuvažuje sklon konce (anhedral), který má potvrzené příznivé účinky na aerodynamickou efektivitu a je u moderních konceptů běžný.

Obecně však lze stanovit, že při počáteční fázi návrhu rotačního křídla je zapotřebí brát v úvahu způsob provozování a nejčastější podmínky. Podle podmínek zvolit profil s vhodným koeficientem vztlaku při Machových rychlostech, ve kterých se bude vrtulník pohybovat. Je zapotřebí také znát počet stupňů volnosti rotorové hlavy. Rozptyl mávání (flapping) by totiž mohl změnit optimální podmínky [6]. Až po této fázi je možné řešit koncové tvary listů.

Jedna z věcí je zvyšování efektivnosti a druhá je snižování hluku, přestože spolu tyto 2 oblasti často souvisí, nemusí být korelace zcela přímá.

Malé jednomístné vrtulníky nemají všechny vymoženosti, které si můžou dovolit velké stroje, jako je právě zmíněná kloubová hlava rotoru, takže jsou pro ně nevhodné šípovité konce. Navíc ty mají největší výhodu při velkých dopředných rychlostech, kterých malé vrtulníky nedosahují.

Komplikací porovnání listů je, že se jejich vlastnosti často mění v závislosti na Machově čísle konce. Obecně lze říci, že efektivnost konců klesá s vyšším Machovým číslem a potřebný výkon vůči získanému tahu roste kvadraticky [20].

O šípovitém konci lze říct, že je výhodnější při velkých dopředných rychlostech, protože díky své geometrii snižuje působící Ma , jak je napsáno v kapitole rozebírající šípovité konce.

Dvojitá šípovitost má dále výhodu dvoufázové ztráty vztlaku, protože první fáze může varovat pilota na hrozbu úplné ztráty vztlaku, jako se toho využívá při začínající ztrátě vztlaku na kontrolních plochách dopravních letadel.

Zajímavé by bylo k optimalizovanému dvojitě šípovitému listu s lichoběžníkovým koncem [19] přidat nějaký sklon, ale výsledkem může také být zcela nevhodná kombinace, protože původní optimalizovaný list s žádným sklonem nepočítá.

Podle porovnání jedné ze studií je nejlepší použít lichoběžníkový a kombinovaný konec při nižším zatížení rotoru a sklon konce (anhedral) zase při vyšším [20]. Lichoběžníkový konec ovšem není vhodný pro malá Re a ani pro vysoká Ma . Ideální poměr zúžení lichoběžníkového konce je 0,4.

Skloněný konec však zvětšuje ohybové namáhání listu, proto vyžaduje tužší list a kořen listu (blade root).

Pro nízké a střední rychlosti je asi nejvhodnější parabolický konec, který by mohl být vylepšený přidáním sklonu, ale chování různých úhlů sklonu při různých podmínkách a rychlostech má příliš neznámých parametrů a půjde o výpočtově náročný úkol.

Úhel sklonu menší než 16° byl podle studie [20], horší než u lichoběžníkového a kombinovaného konce. Optimální úhel sklonu však není známý, ale lze ho očekávat kolem 20° . Tato studie však nedala přesvědčivý důkaz o tom, že je při visu hodnota FoM skloněného konce lepší než u kombinovaného nebo lichoběžníkového konce. Ideálním řešením by provézt měření na modelech a srovnat indukovaný výkon za stejného tahu. Také není jisté, zda se ideální úhel sklonu nezmění se změnou ostatních parametrů listu nebo při jiných letových režimech než je vis.

Konce snažící se snížit hlučnost měli slabší, nebo promíchanější víry, ale vyžadovaly větší výkon. Také nejsou vhodné pro větší rychlosti.

TAMI by se možná dal zkombinovat se sklopeným koncem, protože má rovnou hranu, která je pouze sklopená.

Velmi slibnými se zdají být konce Eagle a Eagle-anhedral, které slibují skvělé vlastnosti při visu i dopředném letu se středními a vysokými otáčkami. Výsledky jsou překvapivé, hlavně protože je Eagle-anhedral složitější rozdělený konec a z toho důvodu by se dalo očekávat, že bude mít větší odpor. Každopádně ale stojí výsledky těchto konců listů za vyzkoušení na modelu v aerodynamickém tunelu.

Objektivní porovnání konců BERP, AGB, ATR a Blue Edge je složité, protože jsou listy podstatou podobné a drobné nuance se mohou projevit i v přechodných letových režimech. Nebylo by proto správné porovnávat pouze indukované ztráty při stejném tahu a hlučnost. Velcí výrobci vrtulníků, kteří používají tyto konce, je stejně bez znatelného rozdílu nebudou měnit a každý pilot může preferovat jiný konec.

Co se týká hlučnosti vrtulníků, tak konce ovlivňují hluk interakce listu s vírem (BVI noise), ale ne hluk vyvolaný první hlavní frekvencí (BPF), který je hlavní složkou celého hluku. Ten je totiž prakticky nemožné ztlumit [14]. Lze změnit jeho frekvenci pomocí nižších otáček, ale to zase přináší svůj vlastní bezpečnostní problém týkající se pouze vrtulníků.

V případě poruchy motoru bude totiž s rotorem, který má nižší kinetickou energii kvůli nižší úhlové rychlosti, složitější nouzově přistát pomocí autorotace [21]. U bezpilotních strojů a strojů bez volnoběžného mechanismu autorotace není možná a proto se snížením otáček bezpečnost nesnižuje.

U listů dronů, které mívají větší zatížení kvůli vyšším otáčkám a malému rozpětí listu vrtule, způsobují právě vysoké otáčky nepříjemný hluk s vysokou frekvencí. Myšlenka studie [40] snížit štíhlost listu vrtule a snížit otáčky je zajímavý způsob jak snížit hluk a zvýšit efektivitu vrtule, který by mohl být výhodný hlavně pro malá a lehká UAV. Tohoto mohou využít malé soukromé drony, které slouží k pořizování videí a průzkumu, kde může být právě důležitá vnímaná hlučnost. Čím lehčí UAV je, tím hůře snáší poryvy větru a to by mohl být pro toto využití problém. Snížení otáček zřejmě také zpomalí dron a nepůjde o řešení vhodné pro multifunkční UAV.

Drony jsou poháněné elektromotory bez převodových poměrů, proto záleží i na jejich účinnostních charakteristikách a nelze je opomenout při snaze udělat vrtule méně štíhlé s pomalejšími otáčkami.

Použití tvary vrtulí inspirovaných přírodou je další vhodný směr vývoje, protože inspirované listy svojí geometrií snižují indukované ztráty. Studie [9] prováděla měření pouze na statické vrtuli, proto by bylo vhodné otestovat, jak se bude vrtule chovat v reálných podmínkách a různých režimech. Inspirovaný list vrtule způsobuje rychlejší promíchání koncových vírů, proto by mohl být ještě vhodnější pro multikoptéry, které mají více navzájem se ovlivňujících vrtulí.

Na efektivitu vrtule v chaotičtějším prostředí proudění, které je u multikoptér, se zaměřila studie [10]. Optimalizovaný šípovitý list by byl spolu s přírodou inspirovaným listem vhodný adeptem na porovnání.

Přestože je *Ducted fan* zajímavým prvkem, který sliboval zvýšení efektivity vrtulí, je velmi nepraktický pro multifunkční UAV. Maximální rychlost 3 m/s není dostačující pro většinu úkonů dronů a ani rychlý vertikální let není pro *ducted fan* vhodným letovým režimem, jak je patrné z měření s postupovými poměry μ . UAV s *ducted fan* je tedy vhodné pro statický vis, ale konstrukcí je přitom méně výhodné pro umístění nákladu pod sebe oproti kvadroptéře.

Kvůli špatnému chování v tranzitních režimech a komplikovanému dopřednému letu koncepty UAM postupně odstupují od použití *ducted fan*, přestože je navíc bezpečnější než otevřená vrtule. Dalším důvodem pro otevřené rotory je právě lepší kompatibilita s fixními křídly, jak je zřejmé z vývojových kroků eVTOL od Airbus [48]. Většina letového času UAM je pak právě horizontální, neboli dopředný let, proto hrají fixní křídla důležitou roli. Ze zmíněných důvodů tak bude zajisté první generace UAM bez *ducted fan*.

Díky menším rozdílům mezi vrtulníky a UAM vůči vrtulníkům a UAV se mohou UAM inspirovat aerodynamicky výhodnými konci listů. Všechny vyvíjené koncepty používají více vrtulí, takže jsou kladeny ještě vyšší nároky na nižší vířivost, která by byla umocněná vzájemným ovlivňováním mezi vrtulemi. Zároveň je u těchto leteckých taxi mnohem větší důraz na nízkou hlučnost, proto se používají inovativní konce, aby se hlučnost minimalizovala v nejmenší možné míře.

Zavedení a optimalizace UAM pak může zpětně rozšířit povědomí o výhodách pokročilých tvarů konců listů vrtulníků.

Závěr

Cílem studie bylo zhodnotit dosavadní výzkum v oblasti rotorů a vrtulí a pokusit se vybrat nejlepší a nejnadějnější koncepty s nejvyšší účinností a nejmenším hlukem.

Není jednoduché vytvořit list, který bude výhodný při všech letových režimech a situacích, protože je návrh závislý na velkém množství parametrů, jako je profil listu, úhel šípovitosti, zúžení, úhel sklonu a rozměry. Listy proto není možné zcela optimalizovat, když mnoho parametrů musí být pevně nastavených. Z toho důvodu se vědecké studie nejčastěji zaměřují jen na pár vybraných návrhů, které mezi sebou poměří za různých podmínek.

Obecně se dá prohlásit, že kromě nahoru sklopeného konce listu (dihedral) je každý tvar konce výkonnostně lepší než základní obdélníkový list a s lepší výkonností je pak často spojená nižší hlučnost.

Z přímých porovnání vyplývá, že lichoběžníkové konce (taper) jsou vhodnější pro nižší zatížení rotoru a listy se sklonem konce (anhedral) zase pro vyšší zatížení. List s parabolickým koncem byl efektivnější při nižších a středních dopředných rychlostech a dvojitě šípovitý (double sweep) při vyšším zatížení.

Velmi nadějně vypadá konec nazvaný Eagle a Eagle-anhedral, který teoreticky předčí dokonce i nejnovější používané konce jako je konec Blue Edge.

Sklon konce listu je vhodný pro kombinování s jinými tvary konců. Výhodný je ve spojení s šípovitým nebo dvojitě šípovitým listem, protože zlepšuje nejen účinnost, ale i aerodynamické vlastnosti. Sklon konce může být také spojen s parabolickým koncem, kterému zvyšuje FoM. Mírný sklon také používá z moderních konců BERP a Blue Edge.

Nejoptimálnější úhel sklonu obdélníkového konce bude kolem 20°, ale u kombinovaných listů se používá menší úhel, proto optimální hodnota nelze snadno zjistit.

U listu s TAMI, který má za cíl snížení hluku, by se přidáním sklonu určitě zvýšila efektivnost, ale jinak jsou listy zaměřující se na snížení hluku nepraktické.

Velký úhel sklonu mají zástupci UAM od firem Joby a Archer. Z toho je vidět, že sklon lze použít i u menších vrtulí, které mají velké zatížení listů. Ideální vrtulí pro otestování přidaného sklonu by byla vrtule inspirovaná křídlem cikády, která nemá velké úhly náběhu konce a při tom je efektivnější než standardní vrtule.

Pro snížení hluku UAV je výhodnější použít více kratších listů než používat toroidní vrtuli. Další možností je použití *ducted fan*, který také zlepší vlastnosti ve statickém visu, ale je nepraktický snad pro všechny ostatní režimy.

Seznam použitých zdrojů

- [1] *Flight Simulator Gives Early Glimpse of eVTOL Aircraft: Embraer looks toward the future of air transport, although the company isn't saying much about its project yet.* Online. In: Business Jet Traveler. 2020. Dostupné z: <https://bjtonline.com/business-jet-news/flight-simulator-gives-early-glimpse-of-evtol-aircraft>. [cit. 2025-05-20].
- [2] JOHNSON, Wayne. *Helicopter theory*. Online. Dover Publications, 1980. ISBN 978-0-486-68230-3. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHT000012/helicopter-theory/helicopter-theory>. [cit. 2025-05-11].
- [3] HLADÍKOVÁ, Libuše. *Návrh měření charakteristik rotoru ve visu*. Online, diplomová práce, vedoucí Ing. Jan KLESA, Ph.D. Praha: České vysoké učení technické, 2021. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/96890/F2-DP-2021-Hladikova-Libuse-Navrh%20mereni%20charakteristik%20rotoru%20ve%20visu.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [cit. 2025-04-22].
- [4] HOUGHTON; CARPENTER; COLLICOTT a VALENTINE. *Aerodynamics for Engineering Students*. Online. 7. Elsevier, 2015. ISBN 978-0-08-100194-3. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9780081001943/aerodynamics-for-engineering-students#book-info>. [cit. 2025-05-22].
- [5] XIE; ZHOU a QIU. Multidisciplinary Aerodynamic Design of a Rotor Blade for an Optimum Rotor Speed Helicopter. Online. *MDPI*. 2017, roč. 7, č. 6. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app7060639>. [cit. 2025-05-11].
- [6] A review of helicopter rotor blade tip shapes. Online. *Progress in Aerospace Sciences*. 2013, roč. 56, č. 56, s. 35-74. ISSN 03760421. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2012.06.003>. [cit. 2025-04-22].
- [7] Helicopter Flight Physics. Online. *Flight Physics - Models, Techniques and Technologies*. 2018, s. 47. ISBN 978-953-51-3807-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/intechopen.71516>. [cit. 2025-05-22].
- [8] BASKARAN; JAMALUDDIN a CELIK. Effects of number of blades on propeller noise. Online. *Journal of Sound and Vibration*. 2024, č. 572. ISSN 0022-460X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X23006259>. [cit. 2025-04-27].
- [9] NING a HU. An Experimental Study on the Aerodynamic and Aeroacoustic Performances of a Bio-Inspired UAV Propeller. Online. *AIAA*. 2017. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/6.2017-3747>. [cit. 2025-04-27].
- [10] SARIKAYA; ZARRI a CHRISTOPHE. Aerodynamic and aeroacoustic design optimization of UAVs using a surrogate model. Online. *Journal of Sound and Vibration*. 2024, roč. 2024, č. 589, article 589. ISSN 0022-460X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2024.118539>. [cit. 2025-04-22].
- [1] ROGER, Michel a MOREAU, Stéphane. Tonal-Noise Assessment of Quadrotor-Type UAV Using

- 1] Source-Mode Expansions. Online. *Acoustics*. 2020, roč. 2, č. 3, s. 674-690. ISSN 2624-599X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/acoustics2030036>. [cit. 2025-05-20].
- [1 KERRICK, Dana. From Wood to Composite Materials The Evolution of the Rotor Blade. Online. In: *Helicopter maintenance*. 02/01/2011. Dostupné z: <https://helicoptermaintenancemagazine.com/article/wood-composite-materials-evolution-rotor-blade>. [cit. 2025-04-28].
- [1 GARİPOVA; BATRAKOV a KUSYUMOV. Aerodynamic and acoustic analysis of helicopter main rotor blade tips in hover. Online. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*. 2016, roč. 2016, č. 26, s. 16. Dostupné z: <http://eprints.gla.ac.uk/116240/>. [cit. 2025-04-22].
- [1 HAGER a VRABEL. *Advanced Turboprop Project: Tech. Rep.* Online. NASA Lewis Research Center, 1988. Dostupné z: <https://doi.org/19890003194>. [cit. 2025-04-27].
- [1 MARQUES; PASCUAL a MALIGNO. The Jinn Military Unmanned Helicopter Program: Rotor Blade Tip Aerodynamics of the Advanced Technology Demonstrator. Online. *International Journal of Unmanned Systems Engineering*. 2013, roč. 2013, č. 1, article 3, s. 6-15. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/273215776_The_Jinn_Military_Unmanned_Helicopter_Program_Rotor_Blade_Tip_Aerodynamics_of_the_Advanced_Technology_Demonstrator. [cit. 2025-05-11].
- [1 KUMAR a RAO. AEROELASTIC ANALYSIS OF DOUBLE-SWEPT ROTOR BLADE IN HOVERING CONDITIONS. Online. *International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics*. 2017, roč. 2017, č. 121, s. 14. Dostupné z: <https://elib.dlr.de/113130/1/IFASD-2017-121.pdf>. [cit. 2025-04-22].
- [1 *FORWARD SWEEP, LOW NOISE ROTOR BLADE* (USA). Přihl.: 6.7.1995. Uděl.: 17.12.1996. 7] 5584661. Dostupné také z: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20080004855/downloads/20080004855.pdf>.
- [1 Tip Vortex Study of a Rotor with Double-Swept Blade Tips. Online. Dostupné z: 8] https://www.researchgate.net/publication/363485313_Tip_Vortex_Study_of_a_Rotor_with_Double-Swept_Blade_Tips. [cit. 2025-05-12].
- [1 SONG a HAN. Aerodynamic/aeroacoustic variable-fidelity optimization of helicopter rotor based on hierarchical Kriging model. Online. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2020, roč. 2, č. 33, s. 476-492. ISSN 1000-9361. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936119303498>. [cit. 2025-05-11].
- [2 ULUOCAK, Sinem. *EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE HELICOPTER BLADE TIP SHAPE EFFECTS ON AERODYNAMIC PERFORMANCE AND TIP VORTEX CHARACTERISTICS*. Online, diplomová práce, vedoucí Prof. Dr. Mustafa Perçin. Ankara: MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY, 2019. Dostupné z: <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12623050/index.pdf>. [cit. 2025-05-11].
- [2 JACOBS a HEGER. ICAO ENVIRONMENTAL REPORT 42 HELICOPTER NOISE REDUCTION TECHNOLOGY ADVANCEMENTS. Online. In: . ICCAIA, 2016, s. 42-45. Dostupné z:

- 1] https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2016/ENVReport2016_pg42-45.pdf. [cit. 2025-04-27].
- [2 AFSHARI, Reza a KARIMIAN, S.M.H. Numerical investigation on the use of various blade tips
2] for the helicopter's main rotor blade in forward flight regarding aerodynamic performance and HSI noise considerations. Online. *Aerospace Science and Technology*. 2024, roč. 2024, č. 149, article 149. ISSN 1270-9638. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S127096382400275X>. [cit. 2025-04-22].
- [2 BROCKLEHURST. *High Resolution Methods for the Aerodynamic Design of Helicopter Rotors*.
3] Online, doktorská práce. Liverpool: University of Liverpool, 2013. Dostupné z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=47057a41f38500f6fac7634337d656efc381ae9c>. [cit. 2025-05-12].
- [2 SHUILIN; FENG a MINGCHUAN. Aerodynamic Performance and Aeroacoustic Characteris-
4] tics of Model Rotor with Anhedral Blade Tip in Hover. Online. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*. 2018, roč. 35, č. 1, s. 162-169. Dostupné z: <https://tnuua.nuaa.edu.cn/html/2018/1/E201801018.htm>. [cit. 2025-05-11].
- [2 AFSHARI a KARIMIAN. A new blade tip geometry to improve aerodynamic performance and
5] acoustic noise of helicopter blade in hovering flight. Online. *Aerospace Science and Technology*. 2023, roč. 2023, č. 135. ISSN 1270-9638. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963823000949>. [cit. 2025-05-11].
- [2 LE PAPE a BEAUMIER. Numerical optimization of helicopter rotor aerodynamic performance
6] in hover. Online. *Aerospace Science and Technology*. 2005, roč. 2005, č. 9, article 9, s. 191-201. ISSN 1270-9638. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2004.09.004>. [cit. 2025-04-27].
- [2 LANDGREBE a BELLINGER. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MODEL VARIABLE GEOME-
7] TRY AND OGEE TIP ROTORS. Online. *NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION*. 1974, s. 113. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740010532/downloads/19740010532.pdf>. [cit. 2025-05-11].
- [2 WHITE. THE STATUS OF ROTOR NOISE TECHNOLOGY. Online. In: *RASA Division, Systems
8] Research Laboratories, Inc.*. S. 723-780. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19790002691/downloads/19790002691.pdf>. [cit. 2025-05-11].
- [2 OTA; HASHIGUCHI a TSUKAHARA. BVI Noise Reduction Research with Canard Blade Tip.
9] Online. In: . Japan: Fuji Heavy Industries, s. 11. Dostupné z: <https://dspace-erf.nlr.nl/server/api/core/bitstreams/63cb1366-0972-448d-83ed-fcf47531c2ad/content>. [cit. 2025-05-12].
- [3 HUBER. HELICOPTER FLIGHT CHARACTERISTICS IMPROVEMENT THROUGH SWEPT-TIP RO-
0] TOR BLADES. Online. *FIFTH EUROPEAN ROTORCRAFT AND POWERED LIFT AIRCRAFT FORUM*. 1979, č. 29, s. 21. Dostupné z: <https://dspace-erf.nlr.nl/server/api/core/bitstreams/f3237d03-c97f-4cee-bb68-907da9dcb760/content>. [cit.

2025-05-22].

- [3 BEAUMIER; VAN DER WALL a PENGEL. From ERATO basic research to the blue Edge™ rotor blade: an example of virtual engineering? Online. *Rotorcraft Virtual Engineering*. 2016. Dostupné z: <https://hal.science/hal-01413109>. [cit. 2025-04-27].
- [3 POURRAJABIAN, Abolfazl. Effect of tip speed ratio on the aerodynamic noise of a small wind turbine: An optimization study. Online. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022, roč. 2022, č. 2265, s. 9. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2265/4/042076/pdf>. [cit. 2025-04-27].
- [3 , Wei a , Ma. Analysis and Evaluation of Aerodynamic Noise Characteristics of Toroidal Propeller. Online. *Drones*. 2024, roč. Drones, č. 12, article 753, s. 8. ISSN 2504-446X. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2504-446X/8/12/753#:~:text=The%20new%20configuration%20not%20only,resulting%20in%20an%20improved%20overall>. [cit. 2025-04-05].
- [3 WU; WANG a DEASY. A Study on the Effect of Toroidal Propeller Parameters on Efficiency and Thrust. Online. *Energies*. 2024, roč. 17, č. 23. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/23/5938>. [cit. 2025-05-13].
- [3 MATSSON, Dr. John E. *A Study of the Efficiency of Toroidal Propeller Designs*. Online, studie. 5] Stockholm: Oral Roberts University in Tulsa, 2024. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://peer.asee.org/a-study-of-the-efficiency-of-toroidal-propeller-designs.pdf&ved=2ahUKEwiqpJuWIKCNaxUY_rslHZcjH6EQFnoECCcQAQ&usq=AOvVaw38Wr-zSrWBGh9qzfOQPxG4. [cit. 2025-05-13].
- [3 PATRAO; LINDBLAD a GRÖNSTEDT. Aerodynamic and aeroacoustic comparison of optimized high-speed propeller blades. Online. *Joint Propulsion Conference*. 2018, s. 16. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/6.2018-4658>. [cit. 2025-04-27].
- [3 YANG; LIU a LI. Aerodynamic and aeroacoustic performance of an isolated multicopter rotor during forward flight. Online. *AIAA*. 2020, roč. 58, s. 1171-1181. ISSN 00011452. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/1.J058459>. [cit. 2025-04-27].
- [3 AKIWATE a PARRY. On the balance between the tonal and broadband noise of uninstalled propellers. Online. *AIAA*. 2021. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/6.2021-2308>. [cit. 2025-04-27].
- [3 KONING; DIMA a ANTONIO. Flight Performance and Acoustics of Asymmetric Propellers with Uneven Blade Spacing. Online. *Quiet Drones 2024*. 2024, s. 16. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/383983286_Flight_Performance_and_Acoustics_of_Asymmetric_Propellers_with_Uneven_Blade_Spacing. [cit. 2025-05-20].
- [4 PRAKHAR; SEO a MITTAL. Bioinspired Drone Rotors for Reduced Aeroacoustic Noise and Improved Efficiency. Online. 2025. Dostupné z: <https://arxiv.org/html/2501.01577v1#bib>. [cit. 2025-04-27].

- [4 ZHANG; QIAO a SMITH. Parametric study of aerodynamic performance of equivalent ducted/un-ducted rotors. Online. *Aerospace Science and Technology*. Roč. 2021, č. 117. ISSN 1270-9638. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106984>. [cit. 2025-04-27].
- [4 YILIMAZ; ERDEM a KAVSAOGLU. Performance of a ducted propeller designed for UAV applications at zero angle of attack flight: An experimental study. Online. *Aerospace Science and Technology*. 2015, roč. 45, s. 376-386. [cit. 2025-05-13].
- [4 DENG; WANG a ZHANG. Aerodynamic performance assessment of a ducted fan UAV for VTOL applications. Online. *Aerospace Science and Technology*. 2020, č. 103. ISSN 1270-9638. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.105895>. [cit. 2025-04-27].
- [4 HONGMING. Aerodynamic Characteristics of a Ducted Fan System Based on Momentum Source Method. Online. In: *Journal of Physics: Conference series*. 2019, s. 7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1300/1/012061>. [cit. 2025-04-27].
- [4 SHUKLA a DHWANIL. Rotor–duct aerodynamic and acoustic interactions at low Reynolds number. Online. *Experiments in Fluids*. 2019, č. 60. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00348-018-2668-z>. [cit. 2025-04-27].
- [4 ZHANG; TAO a BARAKOS. High-Fidelity CFD Validation and Assessment of Ducted Propellers for Aircraft Propulsion. Online. *Journal of the American Helicopter Society*. 2021, roč. 66, č. 1, s. 1-28. Dostupné z: <https://eprints.gla.ac.uk/222911/8/222911.pdf>. [cit. 2025-04-28].
- [4 Textron eAviation Nexus (concept design). Online. In: *Electric VTOL News*. Vertical Flight Society. Dostupné z: <https://evtol.news/textron-eaviation-evtol>. [cit. 2025-04-27].
- [4 GETTINGER, Dan. Airbus Reveals NextGen eVTOL Concept. Online. *Electric VTOL News*. 2021. Dostupné z: <https://evtol.news/news/airbus-reveals-nextgen-evtol-concept>. [cit. 2025-05-14].
- [4 *Adaptive ducted fan propulsion system (USA)*. Přihl.: 2020-09-11. Uděl.: 2023-10-10. 9] US11780560B2. Dostupné také z: <https://patents.google.com/patent/US11780560B2/en>.
- [5 *Lilium*. Online. Dostupné z: 0] https://lilium.com/?_gl=1*xzj908*_up*MQ..*_ga*NTc4MTM1NDc3LjE3NDU3Mzk4ODg.*_ga_9YC7ETNZ98*MTc0NTczOTg4Ny4xLjAuMTc0NTczOTg4Ny4wLjAuMA... [cit. 2025-04-27].
- [5 KILIÁN, Karel. V Německu už mohly létat elektrické taxíky. Nadějný startup Lilium je však před 1] bankrotem. Online. *Živě.cz*. 2024. Dostupné z: <https://vtm.zive.cz/clanky/v-nemecku-uz-mohly-letat-elektricke-taxiky-nadejny-startup-lilium-je-vsak-pred-bankrotem/sc-870-a-230990/default.aspx#>. [cit. 2025-05-14].
- [5 FILTER, Evan J. (USA). *Variable geometry inlet for a ducted fan and method of assembling same*. Bell. Přihl.: 2014-08-26. Uděl.: 2016-03-29. US20160061144A1. Dostupné také z: <https://patents.google.com/patent/US20160061144A1/en>.
- [5 PASCIONI a WATTS. Acoustic Flight Test of the Joby Aviation Advanced Air Mobility Prototype 3] Vehicle. Online. 2022. Dostupné z: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220006729/downloads/Aeroacoustics2022_Pascioni_S

TRIVES5.pdf. [cit. 2025-05-14].

[5 Archer Aviation Midnight (production aircraft). Online. *Electric VTOL News*. 2025. Dostupné z: 4] <https://evtol.news/archer/>. [cit. 2025-05-14].

[5 CAMERON, Neil. The Vertical Aerospace Crash: What happened and what can we learn? On- 5] line. *Flow*. 2023. Dostupné z: https://flowengineering.com/blog/vertical_aero_space/. [cit. 2025-05-14].

[5 SCERRI, Alex. Lessons learned from Joby's 2022 eVTOL accident. Online. *Vertical*. 2024. Do- 6] stupné z: <https://verticalmag.com/opinions/lessons-learned-from-jobys-2022-evtol-accident/>. [cit. 2025-05-14].