



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

OPTIMALIZACE LISTŮ VRTULE

OPTIMIZATION OF PROPELLER BLADES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kryštof Vrbica

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ivo Jebáček, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Bc. Kryštof Vrbica**
Studijní program: Letecká a kosmická technika
Studijní obor: Stavba letadel
Vedoucí práce: **doc. Ing. Ivo Jebáček, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

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 diplomové práce:

Optimalizace listů vrtule

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Srovnání výkonových parametrů současné vrtule a provedení vlastního návrhu s cílem zlepšit výkonové charakteristiky.

Cíle diplomové práce:

- zhodnocení výkonových parametrů stávající vrtule;
- početní analýza a stanovení teoretických výkonových parametrů;
- optimalizace vrtulových listů s ohledem na technologii výroby a jejich návrh;
- zhodnocení přínosů optimalizace.

Seznam doporučené literatury:

ALEXANDROV, V. L.: Letecké vrtule. SNTL, Praha 1954.

THEODORSEN, T.: Theory of Propellers, 1948, McGraw-Hill Book.

LEISHAM, J. G.: Principles of Helicopter Aerodynamics, 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.

ŠVÉDA, J.: Teorie vrtulí a vrtulníků, skripta VAAZ Brno, 1962.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací vrtule ultralehkého letounu pomocí CFD simulací. Teoretická a řešeršní část definuje základní charakteristiky vrtulí, kategorizaci a principy funkce vrtulových listů. Teoretická část je rovněž doplněna o aerodynamické vrtulové teorie.

V práci je následně charakterizována vrtule určená k optimalizaci a dokumenty dodané výrobcem. Simulace jsou prováděny za pomoci metody MRF. Nejprve je popsán proces vytváření a úpravy výpočetní sítě a ověřování dat ze statických testů. Dále se praktická část zabývá úpravou sítě pro simulace za letu a návrhem možných modifikací listů vrtule. Práce je zakončena zhodnocením simulovaných modifikací.

Klíčová slova

Vrtule, list vrtule, optimalizace, CFD, MRF

ABSTRACT

This thesis deals with optimization of a propeller for an ultralight airplane using CFD simulations. The theoretical and research part of the thesis defines the basic propeller characteristics, categorisation and principles of function of propeller blades. The theoretical part also contains overview of the aerodynamic propeller theories.

Subsequently, the thesis characterises the to-be optimized propeller and the documents provided by the manufacturer. Simulations are performed using the MRF method. Firstly, the process of creation and modification of computational mesh is described, along with verification of static test data. The practical part then deals with modifying the mesh for flight simulations and proposals of possible propeller blade modifications. The thesis is concluded with evaluation of simulated modifications.

Key words

Propeller, propeller blade, optimization, CFD, MRF

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VRBICA, Kryštof. *Optimalizace listů vrtule* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-5-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149160>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Ivo Jebáček.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Optimalizace listů vrtule** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat docentu Ivu Jebáčkovi za vedení diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat doktoru Robertu Popelovi, Ing. Janu Navrátilovi a Ing. Robertu Grimovi za drahocenné rady a připomínky. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za podporu a trpělivost.

OBSAH

ÚVOD.....	10
1 Teoretický úvod do leteckých vrtulí.....	12
1.1 Základní stavba vrtule.....	12
1.2 Geometrie listů.....	13
1.3 Profily listů vrtule.....	17
1.4 Typy vrtulí.....	19
1.5 Materiály listů.....	22
2 Aerodynamické teorie vrtulí.....	24
2.1 Hybnostní teorie.....	24
2.2 Teorie elementu listu (Blade element theory – BET).....	26
2.3 Vírová teorie.....	29
3 Výkony vrtule.....	32
3.1 Součinitel tahu.....	33
3.2 Součinitel výkonu.....	34
3.3 Účinnost vrtule.....	35
4 Stávající vrtule.....	36
4.1 Vrtule P1 PowerMax.....	36
4.2 Dodané podklady.....	37
4.3 Model pro statické simulace.....	38
5 CFD analýza stávající vrtule.....	39
5.1 Vytvoření sítě pro statickou simulaci.....	39
5.2 Nastavení Fluentu.....	41
5.3 Vyhodnocení statické simulace.....	42
5.4 Síť pro simulace za letu.....	43
5.5 Letové režimy.....	45
5.6 Mesh dependence study.....	46
6 Optimalizace listu.....	48
6.1 Zkoumané úpravy.....	48
6.2 Výsledky simulací.....	49
7 Zhodnocení optimalizace.....	51
7.1 Zhodnocení výsledků.....	51
7.2 Omezení spojené se zvoleným přístupem k optimalizaci.....	52
8 Závěr.....	53
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	55
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	56
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	58

ÚVOD

První část práce slouží jako teoretický úvod do principů funkce vrtule letounu. První kapitola se krátce zabývá stavbou vrtule, kategorickým rozdělením typů vrtulí a používanými materiály na výrobu vrtulových listů. Dále je zde popsána geometrie listů. Definovány jsou poměrné rozměry listu, například poměrná tloušťka, šířka nebo poloměr. Kapitola rovněž shrnuje princip zkroucení listů a profily využívané v jejich konstrukci.

Druhá kapitola popisuje aerodynamické teorie vrtulí, pomocí kterých lze analyticky počítat výkony dané vrtule na základě její geometrie. Jedná se o teorii hybnostní, teorii elementu listu a vírovou teorii. První, hybnostní teorie je značně zjednodušenou reprezentací vrtule. Vrtule je zde nahrazena tenkým hnacím diskem. Teorie nebere v potaz geometrii listů a dá se využít pouze pro rámcové určení výkonů. Další dvě zmíněné teorie jsou značně více komplexní a jsou si principiálně velmi podobné. Již počítají s jednotlivými řezy listu a s vlastnostmi profilů v těchto řezech. Vírová teorie ovšem přidává do výpočtu také víry vytvářené za vrtulí.

V následující kapitole jsou ve zkratce popsány typické grafy součinitelů tahu a výkonu a účinnosti. Tyto grafy zobrazují základní výkonové charakteristiky vrtulí, které je následně možné u různých vrtulí porovnávat. Typicky jsou určeny na základě statických zkoušek, je však možné je vypočítat s pomocí výše zmíněných teorií.

Ve čtvrté kapitole je definována vrtule určená k optimalizaci. Jedná se o třílistou constant-speed vrtuli P1 PowerMax od společnosti TL-ULTRALIGHT. V kapitole jsou rovněž popsány podklady poskytnuté zadavatelem. Kvůli ochraně důvěrných informací zde není zobrazen výkres listu a data ze statických testů jsou uvedena pouze ve formě grafu bez hodnot. Nakonec je zde popsán vytvořený simulační model listů vrtule a omezení spojená s dodanými podklady.

Další kapitola se již věnuje úvodním simulacím. Pro práci byla zvolena metoda MRF (multiple reference frame), při které je výpočetní síť rozdělena na dvě domény. Jedna doména zastávající okolí je statická, druhá, menší doména, je rotující a má podobu tenkého disku uvnitř něhož je geometrie vrtule. Tato metoda je jednoduchá a má krátký výpočetní čas, není však exaktní. Výsledky simulací jsou následně porovnány s daty ze statických testů. Provedené simulace slouží zároveň jako studie závislosti rozdělení a jemnosti sítě.

Dalším zaměřením páté kapitoly je změna sítě pro simulace za letu. V tomto případě jsou listy umístěny na vrtulový kužel a za nimi je vytvořen zjednodušený model krytu motoru pro korektní simulaci zpomalení proudu před trupem. Pro nesprávnou funkci simulace bylo třeba model rozdělit a ponechat mezery pro průchod rozhraní rotující a statické části sítě. Takto vytvořená síť již generuje korektní výsledky.

Hlavním účelem optimalizace je zvoleno zlepšení vlastností při maximální, případně cestovní rychlosti za zachování výkonů během stoupání. Proto bylo třeba určit, na které úhly je vrtule v daných režimech letu nastavena, čímž se zabývá konec páté kapitoly. Vrtule je typu constant-speed, nebylo tedy možné získat úhly z reálného letu. Úhly byly definovány pomocí simulací, přičemž hlavním určovacím parametrem je kroučící moment motoru.

Šestá a sedmá kapitola již definují a analyzují použité úpravy. Listu jsou ponechány původní profily, je měněna pouze šířka, tloušťka a zkroucení. Pro výzkum je vytvořeno deset úprav. Po úvodních simulacích na maximální rychlosti byly čtyři úpravy vyřazeny a zbytek dále

simulován na rychlostech nižších. Zhodnocení vrtule a jejích úprav a doporučení pro vylepšení optimalizačního procesu jsou shrnuty v sedmé kapitole.

1 Teoretický úvod do leteckých vrtulí

Vrtule je jedním ze zásadních prvků sloužících k funkci letadla. Aby se letadlo udrželo ve vzduchu, je třeba aby vytvářelo vztlak. Toho je typicky dosaženo dopředným pohybem za pomoci vrtule. Vrtule využívá energii dodanou letadlem – ze spalovacího motoru, turbíny nebo jiného zdroje. Tato energie je přetvořena na sílu neboli tah, který překonává odpor letadla vůči vzduchu a umožňuje dopředný let.

Následující kapitola slouží k uvedení čtenáře do tématu leteckých vrtulí. Popsány jsou typické součásti vrtule, kategorické rozdělení vrtulí, základní prvky geometrie listů a materiály, ze kterých jsou listy vyráběny.

1.1 Základní stavba vrtule

Typická vrtule sestává z několika stejných rovnoměrně radiálně rozmístěných listů, které rotují okolo osy. Tyto listy jsou uchyceny v náboji, který přenáší kroutící moment hřídele motoru na vrtuli. Pokročilejší vrtule dále mohou obsahovat stavěcí mechanismus listů, případně další prvky spojené s funkcí vrtule [1].

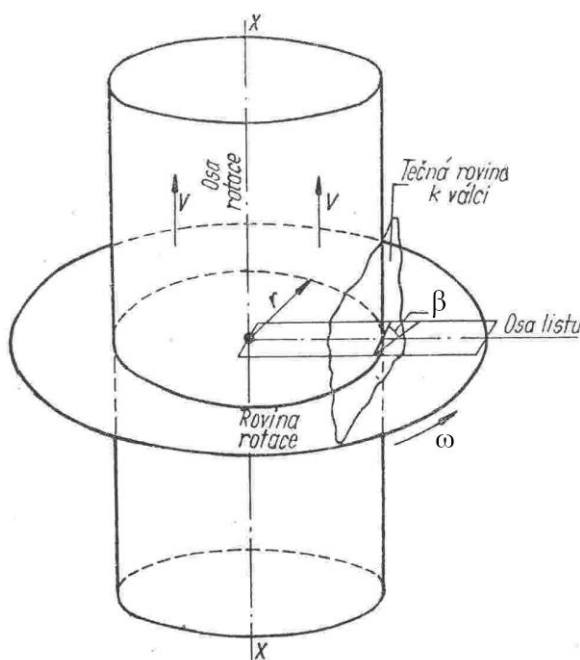


Obr. 1.1: Vrtule od amerického výrobce Sensenich Propellers [2].

1.2 Geometrie listů

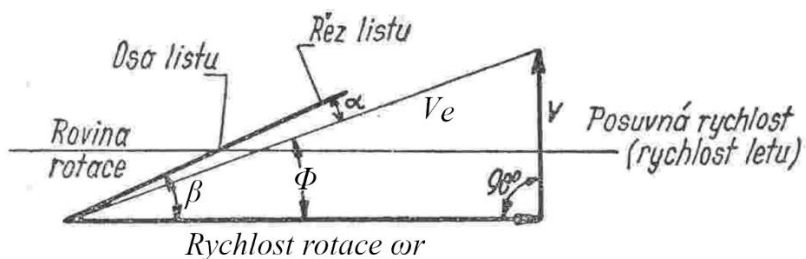
List vrtule koná funkci podobně jako hlavní nosné plochy letadla. Typicky je list v řezu tvořen profilem obdobným tomu, který lze nalézt na křídlech. Při pohybu vzduchem list vytváří vztlak, pouze v jiném směru. Na rozdíl od křídla však nekoná pouze pohyb přímočarý ale rovněž pohyb rotační. Pro základní popis tvaru listu vrtule je předpokládáno následující (viz obr. 1.2):

List má tvar obdélníku, který rotuje okolo osy x úhlovou rychlostí ω a zároveň koná dopředný pohyb rychlostí V podél této osy. Obdélník zároveň svírá s rovinou rotace úhel β . List je protnut válcem s poloměrem r s osou totožnou osou x [1].



Obr. 1.2: Vznik profilu listu [1].

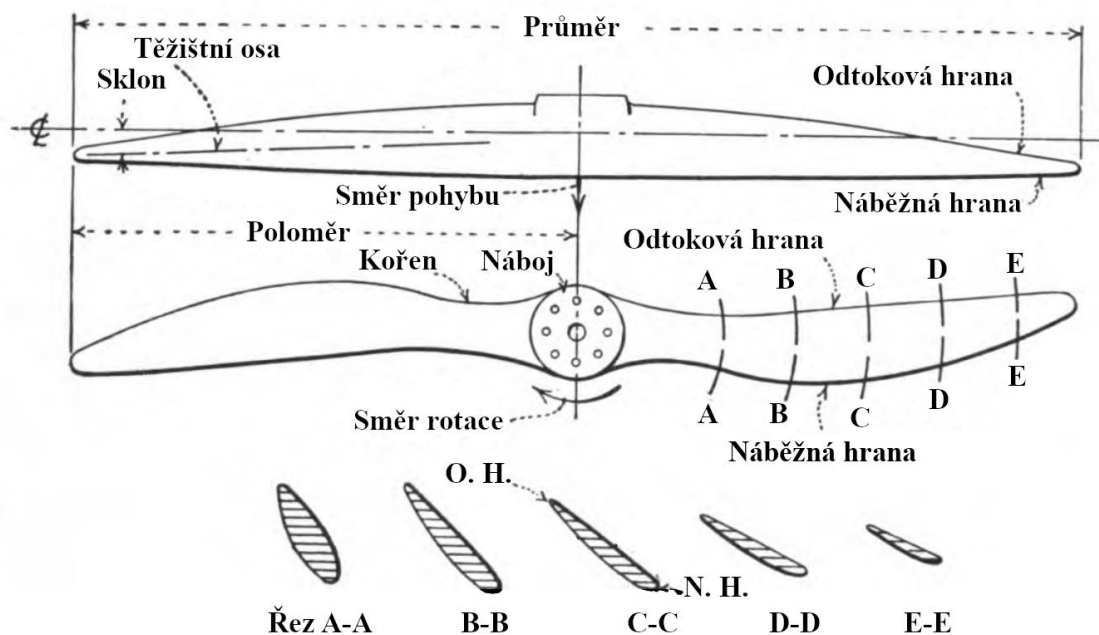
Protnutím vznikne následující rychlostní trojúhelník (obr. 1.3) zobrazující rychlost rotace ωr , dopřednou rychlost V , jejich součet V_e a rovněž úhly α , β a φ . Jedná se o úhel náběhu daného řezu, úhel nastavení listu, respektive úhel náběhu proudu [1].



Obr. 1.3: Rychlostní trojúhelník řezu listu [1].

Při protnutí válcem o větším nebo menším průměru r , vznikne trojúhelník se stejným V ale rozdílnou velikostí vektoru rychlosti rotace ωr . Tím pádem se rovněž změní úhel náběhu řezu α . Se snižujícím se poloměrem by mohl dosáhnout až záporných hodnot.

Vzhledem k faktu, že typický profil vytváří větší vztlak při vyšších úhlech náběhu (do určitých mezí), musí být list vrtule podél své délky kroucen. Tím je dosaženo optimálního úhlu náběhu po celé délce listu [1].



Obr. 1.4: Typická pevná dvoulistá dřevěná vrtule se zobrazením jednotlivých řezů [3].

Geometrii vrtule pro teoretické výpočty definuje několik základní veličin popsanych zde [1]. Zmíněné poměry se rovněž udávají v procentech:

- Poměrná šířka \bar{b}

$$\bar{b} = \frac{b}{D} \quad (1.1)$$

kde b je délka tětivy řezu listu a D je průměr vrtule.

Maximální průměr vrtule D je zásadní při návrhu letadla. Odvíjí se od kritického Machova čísla (popsáno na konci podkapitoly) a určuje výšku podvozku, případně polohu křídel a motorů. Poměrná šířka \bar{b} je typicky nejvyšší v polovině poloměru vrtule a pohybuje se mezi 6 a 10 či více procenty pro různé typy listů [1].

- Poměrný poloměr \bar{r}

$$\bar{r} = \frac{r}{R} \quad (1.2)$$

kde r je poloměr řezu a R je poloměr vrtule.

Za charakteristický poměrný poloměr je považována hodnota 0,75. V tomto řezu se udává úhel nastavení listu β [3].

- Poměrná tloušťka \bar{t}

$$\bar{t} = \frac{t}{b} \quad (1.3)$$

kde t je největší tloušťka profilu řezu na stejném poloměru jako b .

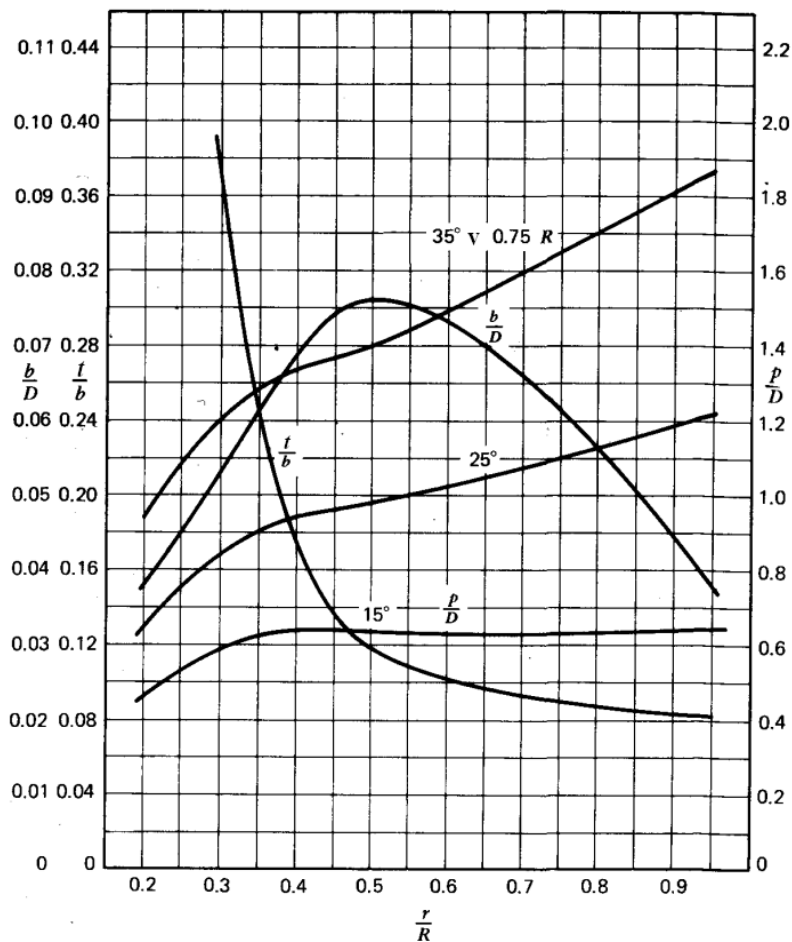
Pro aerodynamiku vrtule je zásadní tloušťka na konci listu. Charakteristickou tloušťkou je proto často řez v poměrném poloměru 0,9. Tato hodnota se mění například v závislosti na materiálu vrtule, kovové vrtule mívají $\bar{t}_{0,9}$ okolo 5 %, dřevěné více jak 7 %. Dále pak v kořeni mohou mít listy tloušťku až 20 %, na konci pouhá 4 % [1].

- Poměrné nastavení p/D [4]

$$\frac{p}{D} = \pi \cdot \bar{r} \cdot \tan\beta \quad (1.4)$$

Kde p je nastavení popisující vzdálenost, kterou by vrtule vykonala během jedné otočky, pokud by se „provrtávala“ vzduchem bez prokluzu .

Na obrázku 1.5 je zobrazen možný průběh zmíněných poměrných hodnot. Tři křivky p/D zobrazují různé průběhy při změně úhlu nastavení listu vyznačeném u křivek (15, 25 a 35°).



Obr. 1.5: Možný průběh geometrických charakteristik podél listu [4].

Jak již bylo zmíněno, zásadním parametrem pro geometrii vrtule, tedy maximální průměr D , je kritické Machovo číslo. Při kritickém Machově čísle náhle prudce narůstá odpor profilu vlivem vzniku kolmých rázových vln. Ty se začínají tvořit v bodě nejvyšší tloušťky profilu přirychlením proudu vzduchu.

V závislosti na typu profilu se tento efekt začíná projevovat v rozmezí 0,6 až 0,8 M . Je proto nutné navrhovat vrtuli tak, aby neměla příliš velký průměr a její konce nedosahovaly těchto rychlostí. Možným způsobem, jak oddálit vznik rázových vln, je konstrukce šípovitých listů vrtule [5].

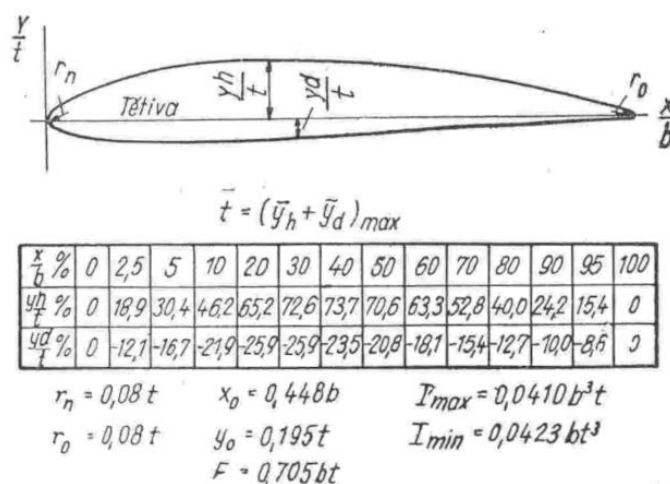


Obr. 1.6: Šípovité listy vrtule pro zvýšení kritického Machova čísla [5].

1.3 Profily listů vrtule

Ve vrtulích různých typů a velikostí se používá široká škála profilů. Navíc tyto profily mohou být kombinovány podél listu a plynule mezi sebou přecházet pro získání nejlepších vlastností vrtule. Pro vyšší rychlosti na koncích vrtule jsou vhodnější profily tenčí, zatímco v kořeni se využívají tlustší, více zakřivené profily pro nízké rychlosti [1].

Na následujícím obrázku je zobrazený možný popis profilu dle Alexandrova [1]. V tabulce jsou zapsány vzdálenosti povrchu od těživy v jejích daných procentech. Dále jsou zobrazeny možné koeficienty pro určení poloměru náběžné a odtokové hrany, r_n respektive r_o , polohy těžiště x_o a y_o , plochy profilu F a momentů setrvačnosti.



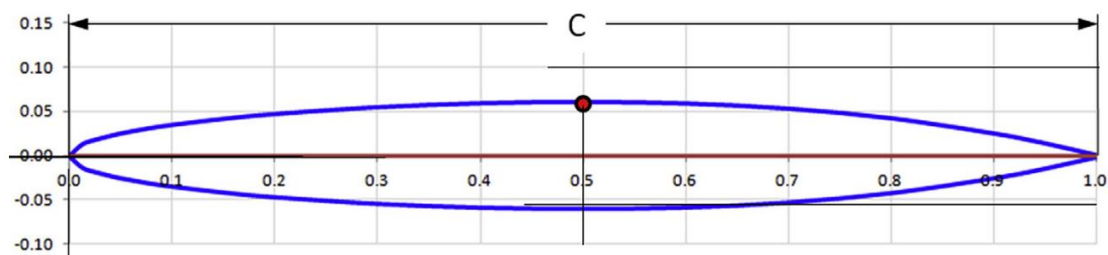
Obr. 1.7: Typický profil vrtulového listu [1].

Jedním z nejznámějších profilů využívaných pro konstrukci vrtulí je Clark Y. Skupina profilů navržená roku 1922 plukovníkem Virginiem Evansem Clarkem byla široce využívána na křídlech i vrtulích ve 20. a 30. letech a pro vrtule je používána dodnes. Profil Clark Y byl vyvinut přenesením průběhu tloušťky německých profilů té doby na profil s rovnou spodní plochou. Díky tomu byl Clark Y jednoduše vyrobitelný. Clark Y navíc zásadně ovlivnil vývoj profilů NACA [6].



Obr. 1.8: Profil Clark Y [6].

Dalším využívaným typem profilů jsou profily NACA. Využívané jsou například čtyřčíselné a pětičíselné řady NACA nebo NACA „1-series“ (také nazývané „16-series“ podle nejpoužívanějšího rozložení tlaku). Poslední zmiňovaný typ byl vyvinut z prvních dvou ve 30. letech a jedná se o profil užívaný primárně pro listy vrtulí. „1-series“ profily předchází vzniku náhlým nárůstům tlaku, což je vlastnost zásadní u vrtulí blízko kritické Machovy rychlosti. Co se týče značení, první číslo – 1, značí řadu profilů. Druhé číslo (v případě nejpoužívanější verze 6) popisuje místo kde se nachází nejnižší tlak při nulovém vztlaku v množství desetin tělvy (tedy v 60 %). Třetí číslo značí průhyb a poslední dvě čísla popisují procentuální tloušťku vůči délce tělvy [5].



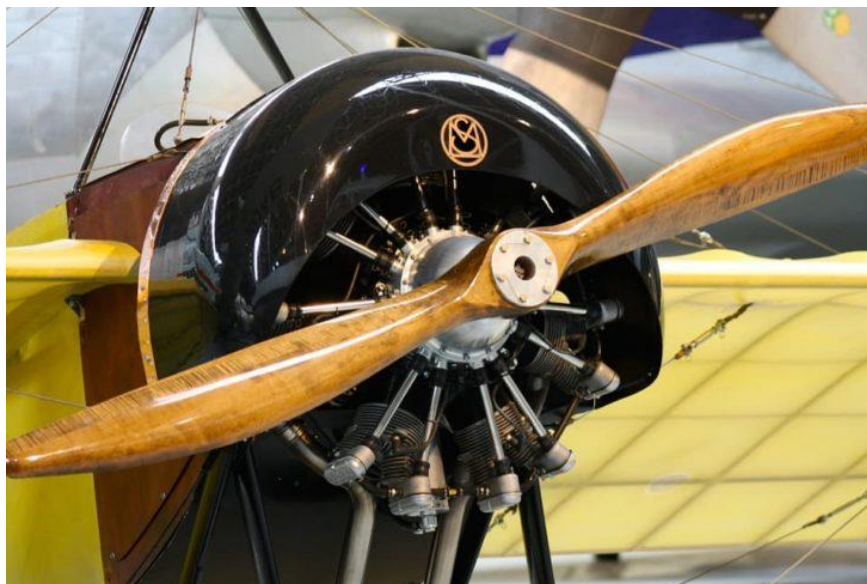
Obr. 1.9: Profil NACA 16-012 [5].

1.4 Typy vrtulí

Pro letouny různých výkonů, rychlostí a využití bylo za posledních více jak sto let vyvinuto velké množství různých typů vrtulí. Jednotlivé typy mohou být velmi konstrukčně rozmanité a složité. Vzhledem k tomu, že se tato práce zabývá primárně vrtulovými listy, je tato kapitola zaměřena hlavně na obecný přehled a popis různých typů vrtulí.

- Pevné vrtule

Pevná vrtule, také zvaná nestavitelná, je konstrukčně velmi jednoduchá. Bývá vyrobena jako jeden celistvý kus, do náboje vrtule je vloženo pouzdro upevněné několika stahovacími šrouby. Toto pouzdro je nasazeno na hřídel motoru a je přes něj přenášen kroučící moment. Výroba je velmi prostá, tato vrtule ovšem umožňuje efektivní práci pouze v jednom přednastaveném režimu letu [1].

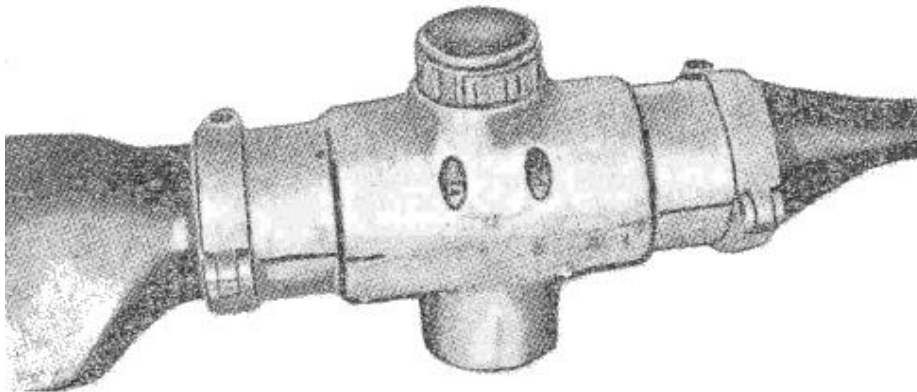


Obr. 1.10: Typický příklad pevné dřevěné vrtule [7].

- Stavitelné vrtule

Stavitelné vrtule mají možnost měnit úhel nastavení listu za účelem optimalizace pro daný režim letu. Dělí se na několik typů – stavitelné na zemi a stavitelné za letu, které se dále dělí dle způsobu nastavení.

Vrtule stavitelné na zemi mají možnost změnit úhel nastavení pro očekávaný režim letu. Každý list je samostatně uložen v náboji a po povolení je možné jím otáčet. Na zemi stavitelné vrtule tím dávají výhodu oproti vrtulím pevným, ovšem pilot je během letu stále odkázán na přednastavený režim [1].

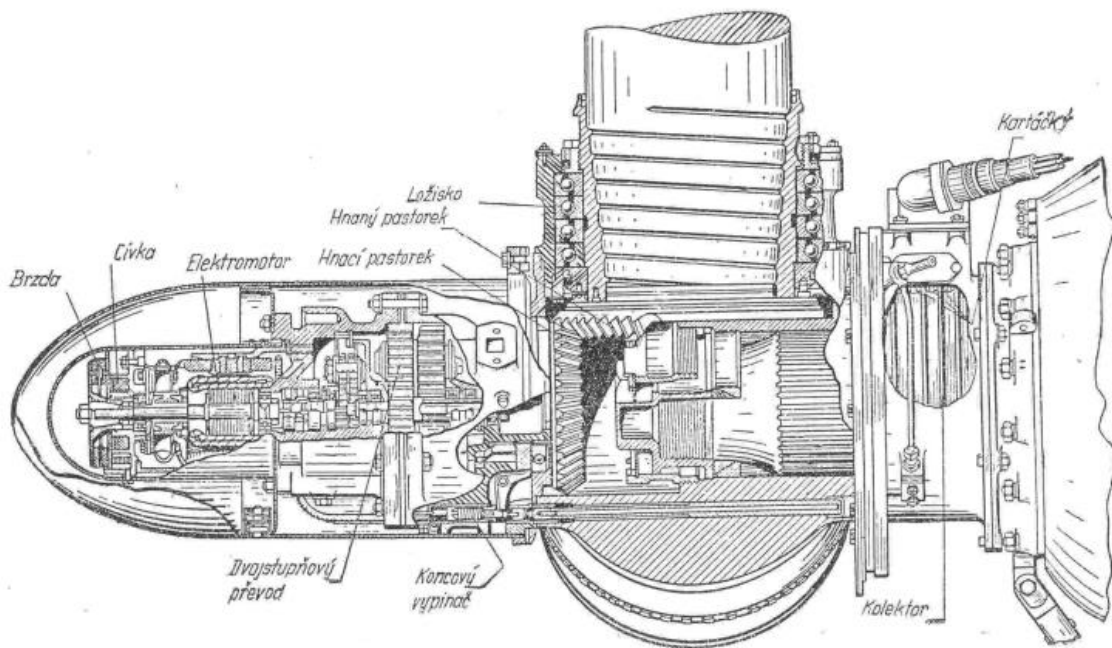


Obr. 1.11: Vrtule stavitelná na zemi [1].

Dnes nejpoužívanější vrtule jsou vrtule stavitelné za letu. Ty mohou být řízeny pilotem nebo automaticky, přičemž nastavení dle automatického systému může záviset na jednom konstantně udržovaném parametru nebo na režimu letu. Vrtule stavitelné za letu se obvykle dělí na tři skupiny – mechanické, hydraulické a elektrické.

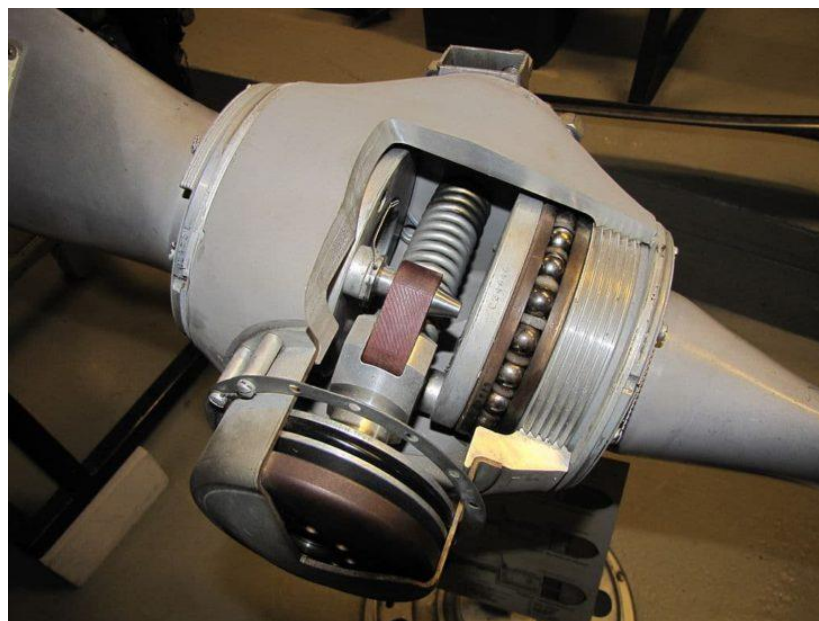
U mechanické stavitelné vrtule je síla k přestavení listů vyvozena mimo vrtuli, tedy pilotem, motorem letadla nebo jinou externí silou, např. nápořem vzduchu. V prvním případě se jedná o nevyužívané řešení, neboť pilotem vyvozená síla nemusí stačit na přestavení vrtule o vysokém výkonu. U převodu momentu z motoru letadla se využívá buďto spojky nebo diferenciálního mechanismu. Obecně se mechanické stavitelné vrtule příliš neujaly kvůli složitosti řešení.

Hydraulické a elektrické stavitelné vrtule využívají k natáčení listů servopohon. K němu je dováděna energie generována motorem, buďto přes čerpadlo hydraulické kapaliny nebo přes generátor elektrické energie. Tyto dva typy mohou být i zkombinovány pro zajištění funkce při vysazení jednoho ze systémů, zvýší se tím ovšem složitost a hmotnost vrtule [1].



Obr. 1.12: Schéma elektricky řízené stavitelné vrtule [1].

Co se týče automatických řízení nastavení vrtule, nejpoužívanějším typem je tzv. constant-speed vrtule. Tento systém zajišťuje udržování konstantních otáček motoru pomocí změny nastavení listů, tím pádem snižuje pracovní zatížení pilota při změnách režimů letu. Například při stoupání je úhel nastavení snížen tak, aby se snížilo namáhání motoru a nedošlo k poklesu otáček. Celý systém je řízen hydraulickým regulátorem, který vyvažuje kroutící moment motoru a moment který vytváří vrtule [7].



Obr. 1.13: Řez vrtulí typu constant-speed [7].

- Ostatní typy vrtulí

Na různých typech letadel se využívají další možná provedení vrtulí. Jedním z nich je vrtule s listy stavitelnými do praporu (obr. 1.14). Tato vrtule umožňuje otočení listů kolmo na nabíhající vzduch. Vzhledem ke zkroucení vrtule to bývá úhel okolo 84° . V případě vysazení pohonné jednotky takové nastavení značně snižuje odpor vzduchu a vibrace na motorovém loži, čímž je zásadně zvýšena bezpečnost.

Dalším specifickým typem vrtule je vrtule reversní. Ta má rozsah nastavení ještě větší než vrtule nastavitelná do praporu. Nastavením listů do záporných hodnot je umožněno účinné brzdění po přistání, případně couvání letadla.

Posledním zde popsaným provedením je vrtule protiběžná. Jedná se o velmi specifické provedení vrtulového pohonu kdy jsou dvě vrtule umístěné přímo za sebe, přičemž jsou poháněné dvěma soustřednými hřídelemi [1].



Obr. 1.14: Příklad vrtule nastavené do praporu na letounu CASA CN 235 [8].

1.5 Materiály listů

Listy vrtule mohou být vyráběny z různých materiálů. Zásadní při volbě materiálu je jeho hustota, neboť těžší materiály generují větší odstředivé síly. To je u vrtule nežádoucí.

Nejdéle využívaným materiálem je dřevo. Vyznačuje se vysokým poměrem pevnosti ku hmotnosti, vysokou únavovou pevností a dobrým vnitřním třením. Nevýhody dřeva ale značně převažují a od počátku letectví dřevo ustoupilo výhodnějším materiálům [3].

Dřevěné vrtule se typicky skládají z několika lepených vrstev laminátu, aby bylo zabráněno kroucení. Nejvhodnější dřeva pro výrobu vrtulí jsou ořech, bříza, dub či mahagon. V rámci ochrany před deštěm, travou či kamínky se konce a náběžné hrany dřevěných vrtulí kovají [3]. Celá vrtule se rovněž kryje textilní tkaninou a vrstvou celuloidu neboť dřevo je hygroskopické [1].

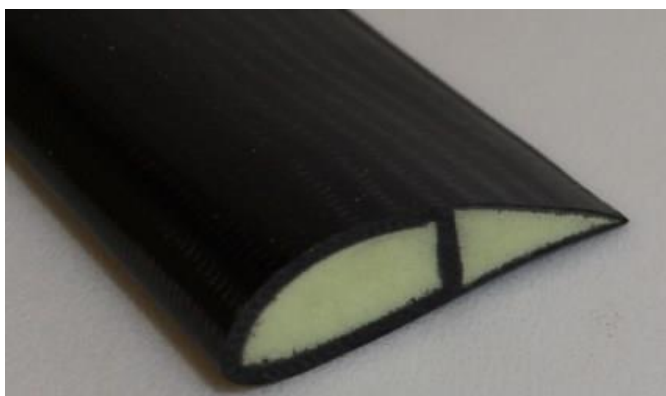
Dřevěné vrtule byly postupně nahrazeny odolnějšími kovovými z duralu, oceli či titanu. Listy jsou v tomto případě často duté a výrazně tenčí, a tedy účinnější než dřevěné. Díky nižší tloušťce mohou být kovové listy delší a pracovat při vyšších otáčkách, neboť nemají tak velký odpor [8]. Hlavní využití mají listy duralové, které jsou oproti oceli lehčí a více odolné vůči únavě a jsou levnější než listy z titanu.

Posledním využívaným materiálem jsou kompozity. První kompozitní vrtule se vyráběly z materiálu Micarta. Jednalo se o tkaninu zvanou grádl (angl. cotton-duck fabric) napuštěnou umělou pryskyřicí která byla spečena ve formě pod vysokým tlakem. Tyto listy měly obdobné vlastnosti jako dřevěné, mohly být výrazně tenčí ale výroba byla podstatně nákladnější [3].

Nejmodernější listy vrtulí jsou vyráběny z kompozitních materiálů z karbonových či aramidových vláken spojených vhodnou matricí, např. epoxidem. Případně lze využít skelná vlákna pro snížení nákladů, ta mají ovšem výrazně horší vlastnosti [8].

Tyto materiály umožňují výrazně snížit hmotnost listů (o 25 až 50 %) a tím pádem snížit setrvačné síly působící na vrtuli a její uložení. Zároveň mají takové kompozitní materiály výbornou tuhost, pevnost a odolnost vůči únavě. Za zmínku rovněž stojí, že díky snížené hmotnosti je možné umístit na jednu vrtuli více kompozitních listů (až osm oproti pěti kovovým) a tím zvýšit efektivitu vrtule [8].

Vláknové kompozity tvoří typicky povrch a vnitřní zpevňující konstrukci listu. Prostory mezi nimi jsou často vyplněny lehkou pěnou, viz obrázek 1.15 [9].



Obr. 1.15: Řez kompozitním listem vrtule [9].

Kompozitní materiály, podobně jako dřevo, jsou náchylné na ošleh a podobná poškození. Proto bývají náběžné hrany opět chráněny, buďto vrstvou kovu, například titanu, nebo vytvrzením speciální pryskyřicí se zvýšenou pevností. Kompozitní materiály jsou rovněž jednodušší na opravu, protože poškozené části se dají nahradit novým materiálem [9].

Za pomoci hybnostní teorie lze určit tah, potřebný výkon a účinnost vrtule. Pro výpočty je předpokládáno, že rovina 1 je daleko před vrtulí a rovina 4 daleko po proudu, v těchto rovinách je tedy ustálený okolní tlak p_0 a rychlost V_∞ . Roviny 2 a 3 jsou přímo před, respektive za vrtulí [4].

Výpočty vycházejí z následující rovnice pro změnu průtoku [4]:

$$\Delta Q = A_3 \cdot V_3 + (S - A_3) \cdot V_\infty - S \cdot V_\infty \quad (2.1)$$

kde ΔQ je změna průtoku, A jsou průměrné plochy proudové trubice v daném řezu, S je průměrná plocha výpočetní domény a V jsou rychlosti vzduchu v daném řezu či nabíhajícím proudu.

Tuto rovnici je možné substituovat do výpočtu pro tah [4]:

$$T = \rho \cdot [A_3 \cdot V_3^2 + (S - A_3) \cdot V^2] - \rho \cdot S \cdot V_\infty^2 - \rho \cdot \Delta Q \cdot V_\infty \quad (2.2)$$

$$T = \rho \cdot A_3 \cdot V_3 \cdot (V_3 - V_\infty) \quad (2.3)$$

$$T = A \cdot (p_2 - p_1) \quad (2.4)$$

kde T je tah, p je tlak a ρ je hustota vzduchu.

Do rovnice tahu lze následně substituovat úpravu Bernoulliho rovnic pro proudění před a za vrtulí [4]:

$$p_0 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 = p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 \quad (2.5)$$

$$p_0 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_3^2 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_2^2 \quad (2.6)$$

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V_3^2 - V_\infty^2) \quad (2.7)$$

Z kombinace rovnic 2.3, 2.4 a 2.7 a faktem že $A_3 V_3 = A_1 V_1$ lze zapsat [4]:

$$V_1 = \frac{(V_3 + V_\infty)}{2} \quad (2.8)$$

Pro další výpočty jsou stanoveny následující rovnosti [4]:

$$V_3 = V_\infty + 2w \quad (2.9)$$

$$V_1 = V_\infty + w \quad (2.10)$$

kde w je rychlost indukovaná vrtulí.

Z těchto rovnic lze zapsat konečná forma rovnice pro tah [4]:

$$T = 2 \cdot \rho \cdot A \cdot (V_\infty + w) \cdot w \quad (2.11)$$

Výsledný potřebný výkon odpovídá [4]:

$$P = T \cdot (V_\infty + w) \quad (2.12)$$

Pro let rychlostí V_∞ lze odvodit následující rovnici pro účinnost vrtule [4]:

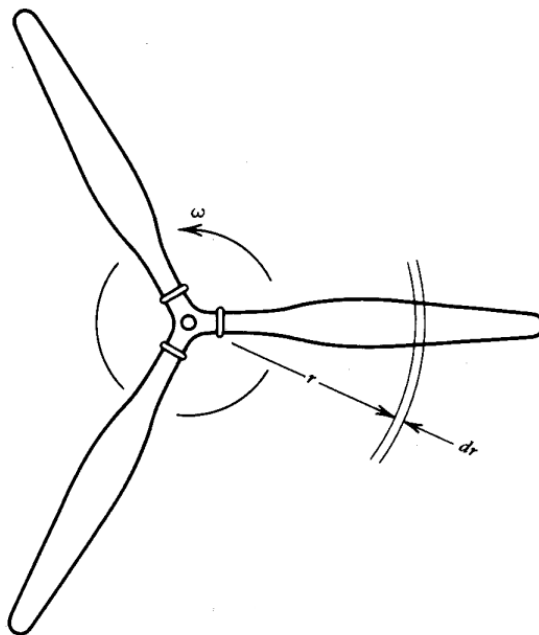
$$\eta_i = \frac{T \cdot V_\infty}{T(V_\infty + w)} \quad (2.13)$$

Vzhledem ke značným zjednodušením v rámci hybnostní teorie, se jedná o méně přesné výpočty. Výpočet tahu udává nejvyšší teoretickou hodnotu tahu. Ta ovšem není dosažitelná vzhledem k zanedbání odporu profilu listů a indukovaného odporu na jejich koncích. Stejný problém se tím pádem projeví u hodnot potřebného výkonu a účinnosti. Tato teorie je ale užitečná při určení indukované rychlosti w [4].

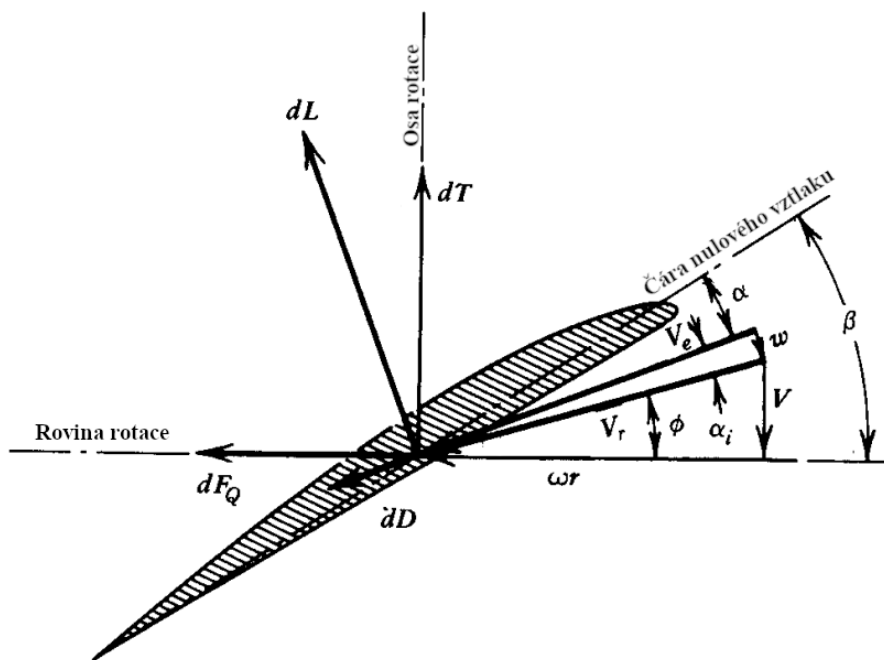
2.2 Teorie elementu listu (Blade element theory – BET)

Tato teorie rozebírá v detailu samotné listy vrtule, napomáhá tedy s přesnějším odhadem vlastností vrtule, případně s jejím návrhem. Listy jsou zde rozděleny na množství malých elementů. Na každém elementu jsou určeny aerodynamické síly, které na něj působí [3].

Obrázek 2.2 zobrazuje typickou třílistou vrtuli točící se úhlovou rychlostí ω a pohybující se vzduchem rychlostí V . Na vrtuli jsou vyznačeny dva soustředné kruhy značící délku řezu dr ve vzdálenosti r od středu rotace. Takto je definován řez listem, tedy element listu [4].



Obr. 2.2: Přední pohled na vrtuli s vyznačeným elementem listu [4].



Obr. 2.3: Element listu, pohled do středu vrtule [4].

Na obrázku 2.3 je zobrazen úhel nastavení listu β v daném elementu, úhel náběhu listu α relativní k nabíhajícímu vzduchu. Vektor V je dopředná rychlost listu, w je rychlost indukovaná, ωr obvodová rychlost a V_e je výsledná rychlost. Vektory dT , dL , dF a dD jsou inkrementy tahu, vztlaku, momentu, respektive odporu. Úhel ϕ značí výsledný úhel směru pohybu elementu listu, α_i pak indukovaný úhel náběhu způsobený indukovanou rychlostí w [4].

Tah a moment dodaný elementem lze zapsat následujícími rovnicemi [4]:

$$dT = dL \cdot \cos(\Phi + \alpha_i) - dD \cdot \sin(\Phi + \alpha_i) \quad (2.14)$$

$$dQ = r \cdot [dL \cdot \sin(\Phi + \alpha_i) + dD \cdot \cos(\Phi + \alpha_i)] \quad (2.15)$$

Příčměž inkrementy dL a dD mohou být vypočteny následovně [4]:

$$dL = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_e^2 \cdot c \cdot c_l \cdot dr \quad (2.16)$$

$$dD = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_e^2 \cdot c \cdot c_d \cdot dr \quad (2.17)$$

kde c je délka tětiny v elementu listu a c_l a c_d jsou koeficienty vztlaku, respektive odporu.

Součinitel vztlaku může být určen z [4]:

$$C_l = a \cdot (\beta - \Phi - \alpha_i) \quad (2.18)$$

kde a je sklon vztlakové čáry profilu

Pro výpočet přidaného tahu a momentu je třeba určit indukovaný úhel náběhu α_i . Jedním ze způsobů je využití hybnostní teorie elementu listu. V tomto případě předpokládáme že α_i a poměr odporu a tlaku jsou malé, a tedy že $V_e \approx V_r$. Pro takové zjednodušení lze zapsat [4]:

$$dT = \frac{B \cdot \rho}{2} \cdot V_r^2 \cdot c \cdot a \cdot (\beta - \Phi - \alpha_i) \cdot \cos\Phi \cdot dr \quad (2.19)$$

kde B je počet listů vrtule.

Aplikací principu hybnosti a za předpokladu, že $w \approx V_r \cdot \alpha_i$, lze zapsat [4]:

$$dT = \rho \cdot (2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr) \cdot (V_\infty + V_r \cdot \alpha_i \cdot \cos\Phi) \cdot 2 \cdot V_r \cdot \alpha_i \cdot \cos\Phi \quad (2.20)$$

Vyrovnáním těchto dvou rovnic vznikne kvadratická rovnice pro indukovaný úhel náběhu α_i . Její úpravou vznikne následující rovnice [4]:

$$\alpha_i = \frac{1}{2} \left\{ - \left(\frac{\lambda}{x} + \frac{\sigma \cdot a \cdot V_r}{8 \cdot x^2 \cdot V_T} \right) + \left[\left(\frac{\lambda}{x} + \frac{\sigma \cdot a \cdot V_r}{8 \cdot x^2 \cdot V_T} \right)^2 + \frac{\sigma \cdot a \cdot V_r}{2 \cdot x^2 \cdot V_T} \cdot (\beta - \Phi) \right] \right\} \quad (2.21)$$

kde

$$\lambda = \frac{V}{\omega R} \quad V_r = V_T \sqrt{x^2 + \lambda^2}$$

$$\sigma = \frac{Bc}{\pi R} \quad \phi = \tan^{-1} \frac{\lambda}{x}$$

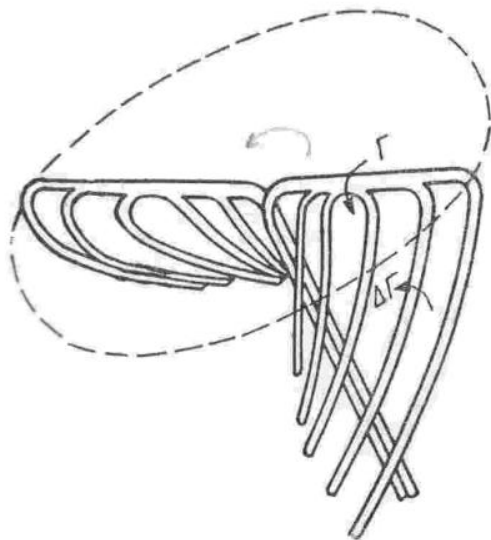
$$V_T = \omega R \quad x = \frac{r}{R}$$

Obr. 2.4: Veličiny pro výpočet rovnice 2.21 [4].

2.3 Vírová teorie

Dalším možným způsobem určení vlastností vrtule je využití vírové teorie. Ta vychází z vírů vytvořených listy vrtule, které v úplavu vrtule vytváří šroubovitě vírové vrstvy. Vírová teorie pracuje s indukovanou rychlostí ve víru a aerodynamickou reakcí listů na tyto rychlosti.

Jedná se o velmi komplexní výpočet, proto je často zavedeno zjednodušení, kdy je vrtule vnímána s velkým počtem listů. Tím pádem je indukovaná rychlost napříč uvažovanou vrtulí rovnoměrná a vírová teorie dostává formu podobnou teorii elementu listu, která ovšem zahrnuje další vlivy na vrtuli [10].

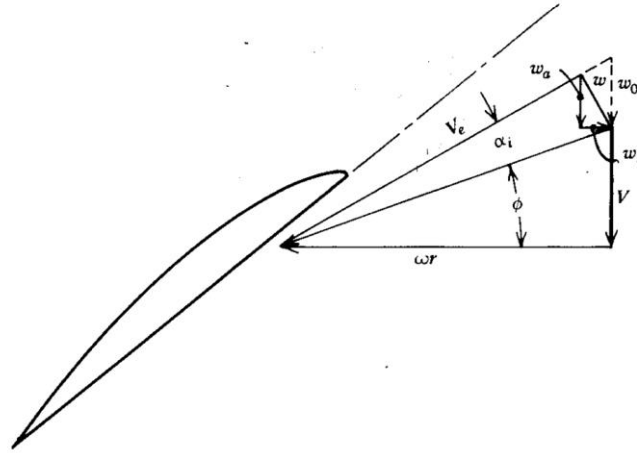


Obr. 2.5: Nahrazení nosné plochy soustavou vírů dle Žukovského [1].

Vírová teorie nabízí alternativní odvození výpočtu indukovaného úhlu náběhu α_i pro výpočet tahu a momentu vrtule oproti BET. To je provedeno následovně [4]:

$$\frac{V + w_a}{\omega r - w_t} = \frac{w_t}{w_a} \quad (2.22)$$

kde w_a je axiální složka indukované rychlosti w a w_t je tečná složka téže rychlosti. Rychlosti jsou graficky znázorněny na obr. 2.6.



Obr. 2.6: Zobrazení složek indukované rychlosti na listu [4].

Vyřešením rovnice 2.22 a vyjádřením rychlostí přes V_T obdržíme [4]:

$$\frac{w_a}{V_T} = \frac{1}{2} \left[-\lambda + \sqrt{\lambda^2 + 4 \cdot \frac{w_t}{V_T} \cdot \left(x - \frac{w_t}{V_T} \right)} \right] \quad (2.23)$$

Vírová teorie vztahuje tečnou složku indukované rychlosti na nosný vír [4]:

$$B\Gamma = 4 \cdot \pi \cdot r \cdot F \cdot w_t \quad (2.24)$$

kde B je počet listů vrtule, Γ je cirkulace a F je součinitel ztráty na konci listu dle Prandtl [4]:

$$F = \frac{2}{\pi} \cdot \cos^{-1} \exp \left[-\frac{B(1-x)}{2 \cdot \sin \Phi_T} \right] \quad (2.25)$$

kde Φ_T je úhel sklonu vírové šroubovice na konci listu. Ten může být brán jako roven $\tan^{-1} \lambda$ nebo β_T .

Cirkulace odpovídá [4]:

$$\Gamma = \frac{1}{2} \cdot c \cdot C_l \cdot V_e \quad (2.26)$$

Substitucí rovnice 2.26 do 2.24 vznikne [4]:

$$\sigma \cdot C_l \cdot \frac{V_e}{V_T} = 8 \cdot x \cdot F \cdot \frac{w_t}{V_T} \quad (2.27)$$

kde C_l a V_e/V_T mohou být vypočteny následovně [4]:

$$C_l = a \cdot \left(\beta - \tan^{-1} \frac{w_t}{w_a} \right) \quad (2.28)$$

$$\frac{V_e}{V_T} = \left[\left(\lambda + \frac{w_a}{V_T} \right)^2 + \left(x - \frac{w_t}{V_T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.29)$$

Za předpokladu, že α_i je malé, lze přímo zapsat [4]:

$$w_t = V_r \cdot \alpha_i \cdot \sin(\Phi + \alpha_i) \quad (2.30)$$

Výsledkem je [4]:

$$\alpha_i = \frac{1}{2} \left(-X + \sqrt{X^2 + 4 \cdot Y} \right) \quad (2.31)$$

kde:

$$X = \tan \Phi + \frac{a \cdot \sigma}{8 \cdot x \cdot F \cdot \cos \Phi} \quad (2.32)$$

$$Y = \frac{\sigma \cdot a \cdot (\beta - \Phi)}{8 \cdot x \cdot F \cdot \cos \Phi} \quad (2.33)$$

Vírová teorie je ze tří zmíněných teorií nejsložitější. Popisuje však detailně indukované rychlosti a proudění za vrtulí, je tedy nejvíce korektní a je možné s ní dosáhnout nejpřesnějších výsledků.

3 Výkony vrtule

Nejjednodušším způsobem obdržení charakteristik vrtule a jejích výkonů jsou stále praktické zkoušky. Jejich výsledky jsou typicky zapisovány v několika grafech, které jsou krátce popsány v této kapitole.

Ve všech těchto grafech se jako reference používá tzv. postupové číslo (nebo také rychlostní poměr) J [4]:

$$J = \frac{V}{n \cdot D} \quad (3.1)$$

kde n je počet otáček za vteřinu.

V grafech zobrazujících průběhy součinitelů jsou hodnoty ze statických testů pro třílistou vrtuli označenou 5868-R6 s profilem Clark Y. Kromě hodnot získaných zkouškami jsou v nich zobrazeny i hodnoty vypočtené za pomoci vírové teorie pro úhel nastavení 35° . Je tedy možné vidět odchylku oproti skutečným hodnotám, která odpovídá přibližně 1° [4].

3.1 Součinitel tahu

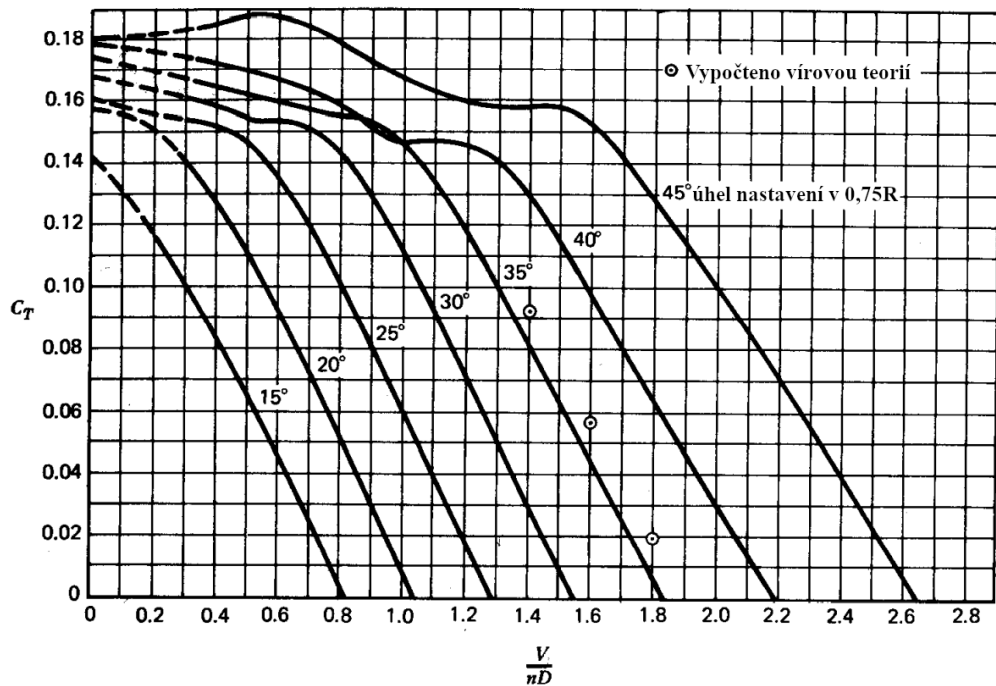
Součinitel tahu je bezrozměrné vyjádření tahu. Tento součinitel může být definován vícero způsoby. Nejzákladnějším z nich je následující rovnice (3.2), kde je součinitel určen jako tah v poměru ku násobku hustoty a mocnin otáček a průměru vrtule [4]:

$$C_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \quad (3.2)$$

Pro analytický výpočet je možné využít rovnic pro výpočet parametrů vrtule dle teorie elementu listu (2.14 až 2.17), čímž vznikne následující rovnice [4]:

$$C_T = \frac{\pi}{8} \int_{x_h}^1 (J^2 + \pi^2 \cdot x^2) \cdot \sigma \cdot [C_l \cdot \cos(\Phi + \alpha_i) - C_d \cdot \sin(\Phi + \alpha_i)] dx \quad (3.3)$$

kde x_h je vzdálenost počátku listu od osy otáčení.



Obr. 3.1: Křivky součinitele tahu pro různé úhly nastavení vrtule 5868-R6 [4].

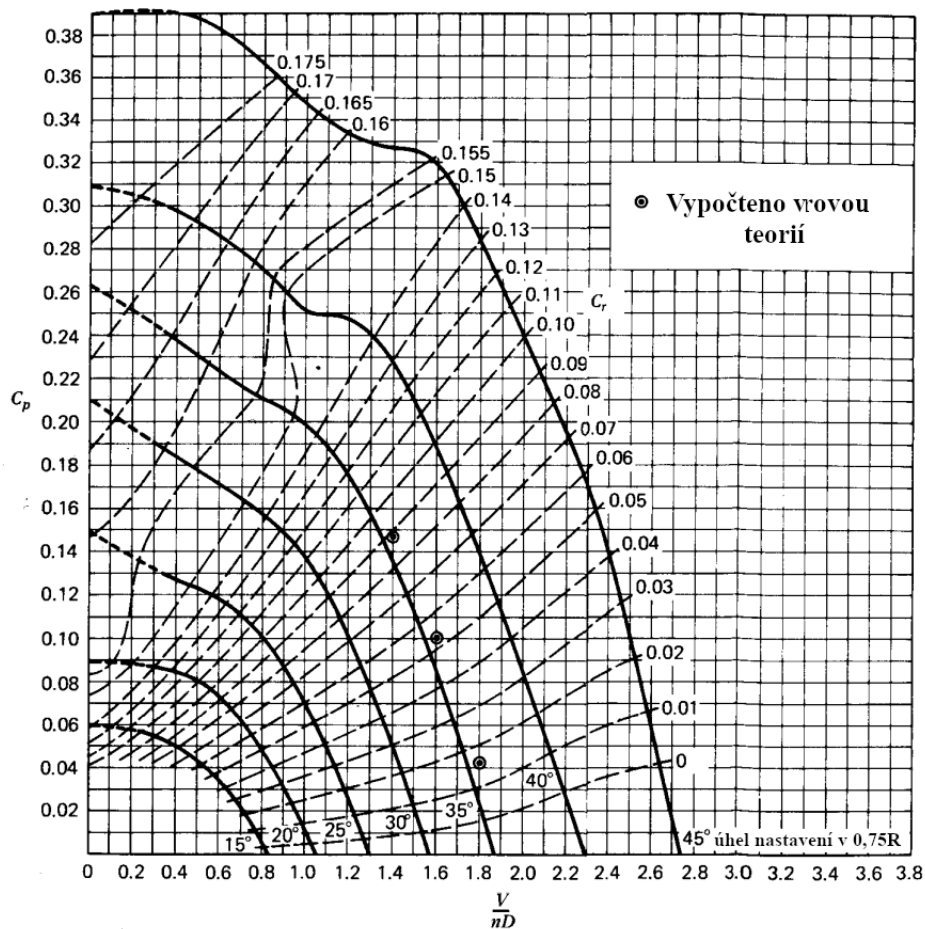
3.2 Součinitel výkonu

Součinitel výkonu je rovněž bezrozměrným vyjádřením výkonu. Opět je možné jej definovat více způsoby. V základní rovnici (3.4) je v porovnání se součinitelem tahu dáván výkon do poměru s otáčkami a průměrem vrtule o jednu mocninu výše.

$$C_P = \frac{P}{\rho \cdot n^3 \cdot D^5} \quad (3.4)$$

Stejně jako u součinitele tahu je možné tento součinitel vypočítat s využitím teorie elementu listu [4]:

$$C_P = \frac{\pi}{8} \int_{x_h}^1 \pi \cdot x \cdot (J^2 + \pi^2 \cdot x^2) \cdot \sigma \cdot [C_l \cdot \sin(\Phi + \alpha_i) + C_d \cdot \cos(\Phi + \alpha_i)] dx \quad (3.5)$$

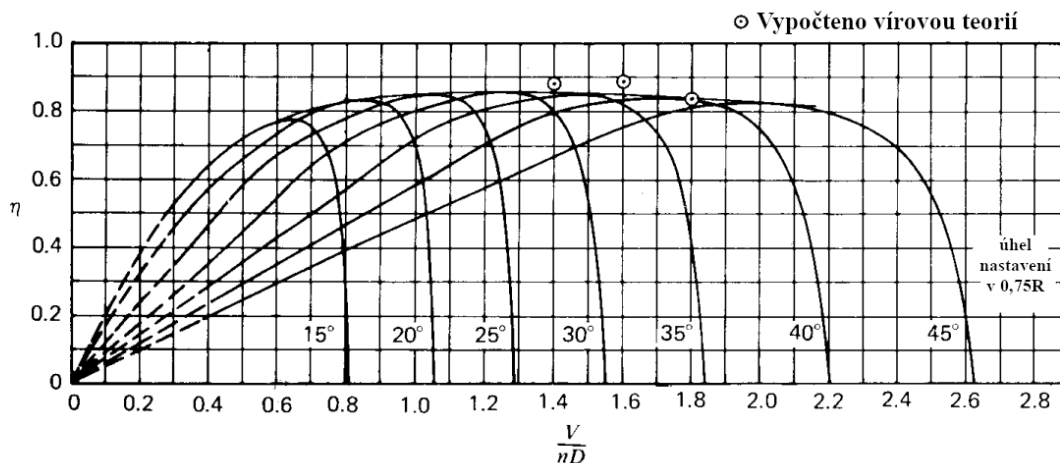


Obr. 3.2: Křivky součinitele výkonu pro různé úhly nastavení vrtule 5868-R6 [4].

3.3 Účinnost vrtule

Pokud jsou známy součinitele tahu a výkonu a postupové číslo, případně přímo hodnoty tahu, výkonu a rychlosti, je možné spočítat účinnost vrtule [4]:

$$\eta = \frac{T \cdot V}{P} = \frac{C_T \cdot J}{C_P} \quad (3.6)$$



Obr. 3.3: Křivky účinnosti vrtule pro různé úhly nastavení vrtule 5868-R6 [4].

Podle křivek účinnosti rozdělujeme nastavení vrtule na tzv. lehkou a těžkou vrtuli. Nastavení s křivkou s maximální účinností při nižších J se nazývají lehké. Nastavení s vysokou účinností při vyšších J se nazývají těžké. Lehké vrtule jsou vhodnější pro stoupání, těžké pro rychlý vyrovnaný let.

V případě vrtule typu constant-speed se bude jednat o jedinou křivku s vysokou účinností napříč širokým spektrem J .

4 Stávající vrtule

Hlavním předmětem této práce je optimalizace stávající vrtule. Cílem je dosáhnout lepších výkonových parametrů změnou různých charakteristik vrtule, které budou popsány v následujících kapitolách. V této kapitole je krátce popsána optimalizovaná vrtule a omezení plynoucí z dat dodaných výrobcem.

4.1 Vrtule P1 PowerMax



Obr. 4.1: Vrtule P1 PowerMax na letounu Sting S4 [11].

Vrtule určená k optimalizace je vrtule P1 Powermax od společnosti TL-ULTRALIGHT. Jedná se o třílistou za letu stavitelnou vrtuli s možností režimu constant-speed. Listy jsou vyrobeny z kompozitu z uhlíkových vláken s ocelovým uložením v hliníkovém náboji. Obecné veřejně dostupné informace jsou shrnuté v následující tabulce [11].

Tab. 4.1: Obecné informace k vrtuli P1 PowerMax [11]

Parametr	Jednotky	Hodnota
Smysl otáčení	[-]	Vlevo (při pohledu zepředu)
Orientace instalace vrtule	[-]	Tažná
Počet listů	[-]	3
Průměr	[mm]	1 748
Max. absorbovaný výkon motoru	[HP]	115
Maximální otáčky vrtule	[ot/min]	2387
Rozsah nastavení úhlů listů	[°]	10
Rychlost nastavení z jedné krajní polohy do druhé	[s]	4,6
Rozsah provozních teplot	[°C]	-25 až + 40
Hmotnost vrtule	[kg]	10,2
Hmotnost servomotoru a ovládání vrtule	[kg]	1,25
Hmotnost vrtulového kužele	[kg]	0,5
Vnější průměr vrtulového kužele	[mm]	235
Průměr upevňovací příruby	[mm]	124

Vrtule P1 je primárně určena pro různé verze motoru Rotax 912. V této práci je uvažována verze ULS. Základní parametry jsou uvedeny v tabulce:

Tab. 4.2: Parametry motoru Rotax 912 ULS [12].

Parametr	Jednotky	Hodnota
Výkon (při 5800 ot/min)	[kW]	73,5
Krouticí moment	[Nm]	128
Maximální otáčky	[ot/min]	5800
Zdvihový objem	[cm ²]	1352
Reduktor	[-]	2,43

4.2 Dodané podklady

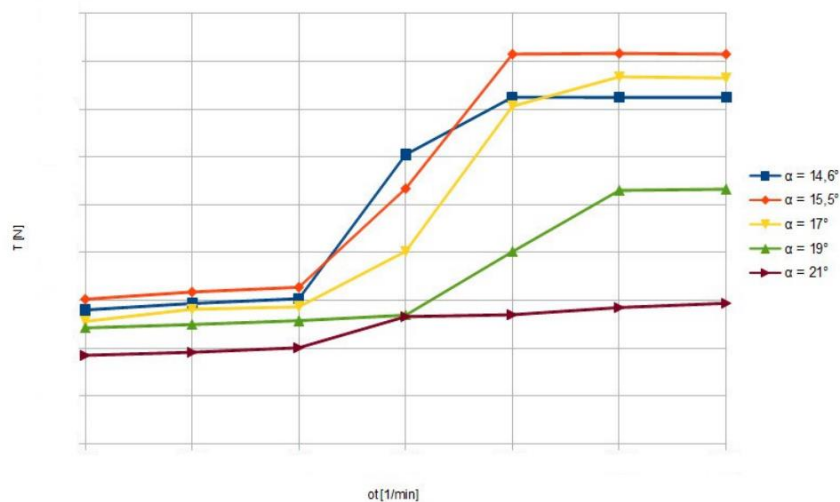
Kvůli optimalizaci vrtule byly firmou TL-ULTRALIGHT dodány detailnější podklady. Konkrétně výkres listu a protokol ze statických zkoušek s naměřenými hodnotami kroutícího momentu, tahové síly a výkonu pro různé úhly nastavení a otáčky.

Na následujícím obrázku je záběr ze statických zkoušek vrtule P1. Kvůli měřicímu zařízení musela být vrtule umístěna do tlačné konfigurace.



Obr. 4.2: Vrtule P1 PowerMax při statické zkoušce v tlačném uspořádání.

Kvůli dodaným podkladům byla podepsána smlouva o ochraně důvěrných informací. Výkres listu a konkrétní data zde proto nejsou uvedeny. Na následujícím obrázku jsou zobrazeny křivky tahu v závislosti na otáčkách pro různé úhly nastavení vrtule P1 PowerMax. Konkrétní hodnoty jsou vymazány.



Obr. 4.3: Průběhy tahu v závislosti na otáčkách pro různé úhly nastavení vrtule P1.

4.3 Model pro statické simulace

Pro optimalizaci vrtule byla zvolena CFD simulace (dále popsána v následujících kapitolách). V programu Catia byl zhotoven model listů dle výkresu s uložením dle statických zkoušek. Měřící zařízení nebylo v modelu zohledněno, neboť se jedná o statické zkoušky a jeho aerodynamický vliv bude minimální.

Je nutné zdůraznit, že vytvořený model není přesnou reprezentací skutečné vrtule. Jednotlivé řezy ve výkresu nejsou konkrétní označené profily, je vyobrazena pouze graficky jejich geometrie. Proto musely být řezy načrtnuty dle výkresu a jejich tvar tedy nemusí být přesný. Nepřesnosti mohou být rovněž v umístění řezů ve směru kolmo na list, tedy podél tětiny řezu či kolmo na ni. S přihlédnutím k technologii výroby byly odtokové hrany listů zvoleny s tloušťkou 1,5 mm.



Obr. 4.4: Model vrtule s trojúhelníkovým uložením dle statického testu.

5 CFD analýza stávající vrtule

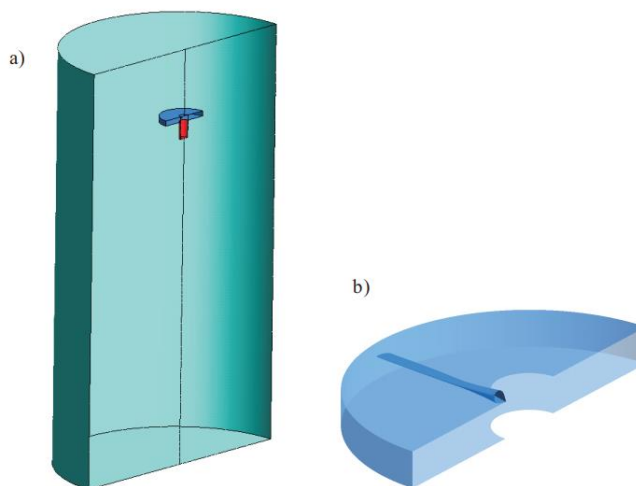
Pro výpočet a následnou optimalizaci byla zvolena simulace pomocí CFD. Pro vytváření výpočetních sítí byl zvolen program ANSA, simulace byly provedeny v programu Fluent. Následující kapitola popisuje tvorbu výpočetní domény a nastavení výpočtu.

5.1 Vytvoření sítě pro statickou simulaci

Pro simulace vrtulí, lodních šroubů či větrných turbín se často využívá CFD metody označené jako MRF (multiple reference frame). Při ní je vytvořeno více objemových domén. Typicky je jedna vytvořena jako plochý válec (disk) okolo sledovaného objektu, přičemž tato doména je pevně vázána na geometrii objektu. Plochý válec je umístěn do většího, delšího válce, který slouží jako doména okolního vzduchu.

Sít' vnitřního válce s geometrií vrtule je při simulaci rotována rychlostí odpovídající rotaci vrtule, zatímco vnější sít' zůstává statická. Tato metoda umožňuje výrazné snížení výpočetního času a zjednodušení sítě v porovnání s dynamickými sítěmi, proto byla využita rovněž v této práci. Metoda MRF ovšem není exaktní, protože listy nerotují vzhledem k okolní síti v malém válci.

Pro zvolení rozměrů domén a sítě byly využity poznatky ze simulací na Technické Univerzitě v Lodži [13]. Zde byla simulována dvoulistá vrtule pro elektrický VTOL prostředek, přičemž pro urychlení výpočtů byla simulována jen půlka domény s periodicitou, viz obrázek.



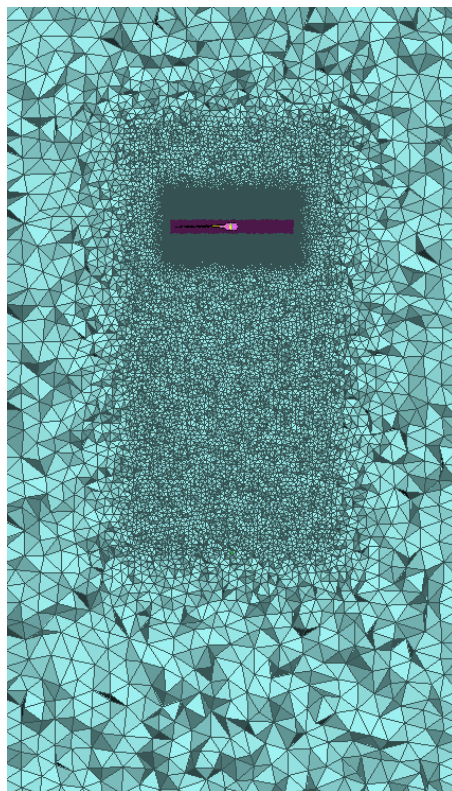
Obr. 5.1: Možné provedení metody MRF s využitím periodicity: a) celá výpočtová doména, b) detail rotující domény [13].

V následující tabulce jsou shrnuty zvolené rozměry domén pro statickou CFD simulaci vrtule P1 PowerMax. Rozměry byly zvoleny obdobně s osvědčenými hodnotami ze simulací na Lodžské univerzitě pro dostatečné rozvinutí proudu za vrtulí.

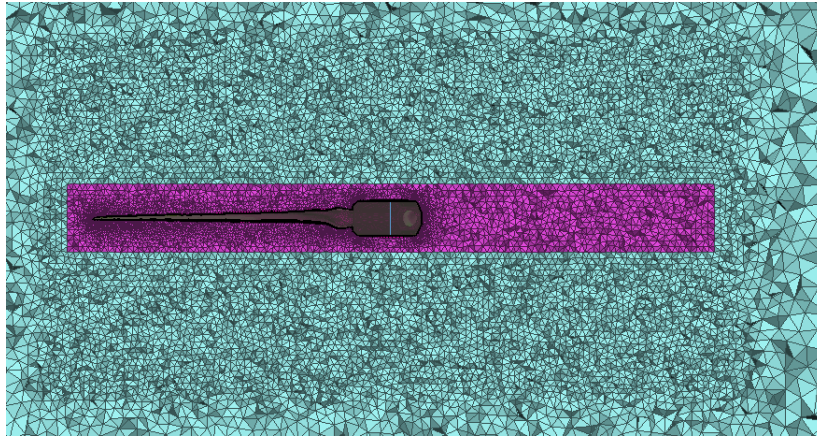
Tab. 5.1: Zvolené rozměry domén pro vytvoření sítě pro CFD simulaci.

Rozměr	Poměr vůči vrtuli	Velikost [mm] (zaokrouhleno)
Výška rotující domény	2-4x šířka listu v 0,75 R	400
Průměr rotující domény	–	1 900
Výška statické domény	10x průměr vrtule	17 400
Část statické domény před vrtulí	2x průměr vrtule	3 400
Průměr statické domény	4x průměr vrtule	7 000

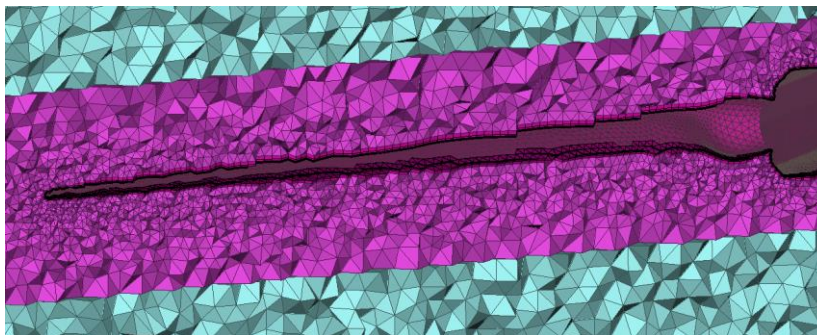
Na obrázcích níže je zobrazeno rozdělení sítě ze statického testu. Okolo rotující domény byly umístěny dvě pole omezující velikosti buněk (tzv. size box) pro detailní simulaci v okolí vrtule a v úplavu. Pro síť byly zvoleny tria elementy na povrchu listů se zjemněním na náběžné a odtokové hraně. Prostorová síť je tvořena elementy Tetra Rapid s 18 prizmatickými vrstvami na povrchu listů a uložení. S tímto nastavením má rotující doména 11 milionů buněk, statická doména 5 milionů buněk.



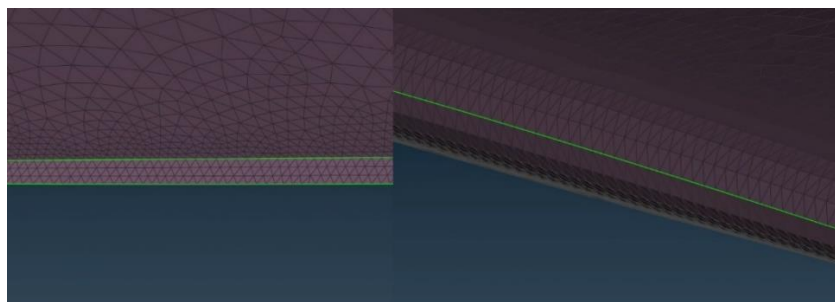
Obr. 5.2: Úprava jemnosti sítě statické domény v okolí a v úplavu vrtule.



Obr. 5.3: Síť na rozhraní rotující a statické domény.



Obr. 5.4: Detail prizmatických vrstev na povrchu listu.



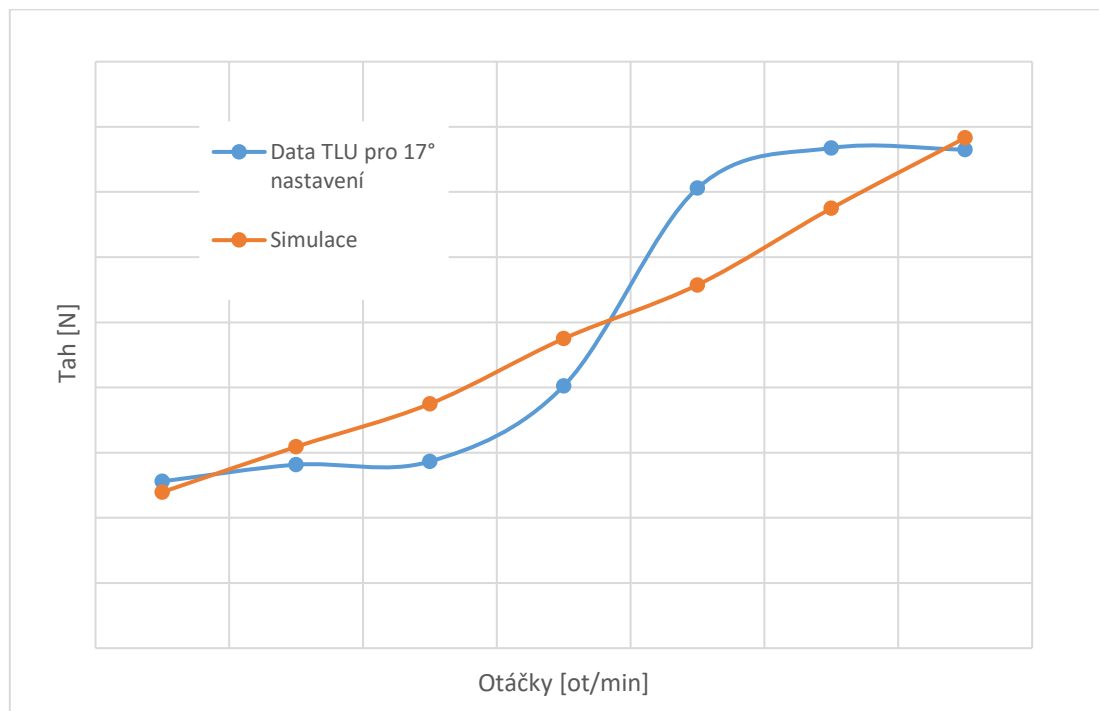
Obr. 5.5: Detail sítě na odtokové (vlevo) a náběžné hraně (vpravo).

5.2 Nastavení Fluentu

Pro simulace byl nastaven tlak a teplota naměřené při statickém testu. Simulace byla provedena jako stálá se simulačním modelem SST k-omega. Okraje statické domény byly nastaveny jako stěna s nulovým smykem. Rotace byla zavedena přes 'Frame motion'. Výpočetní metoda byla zvolena SIMPLE. Stejné nastavení bylo zvoleno pro pozdější simulace za letu, pouze s výpočetní metodou Coupled a tlakem odpovídajícím standardní atmosféře (101 325 Pa) s připočteným dynamickým tlakem.

5.3 Vyhodnocení statické simulace

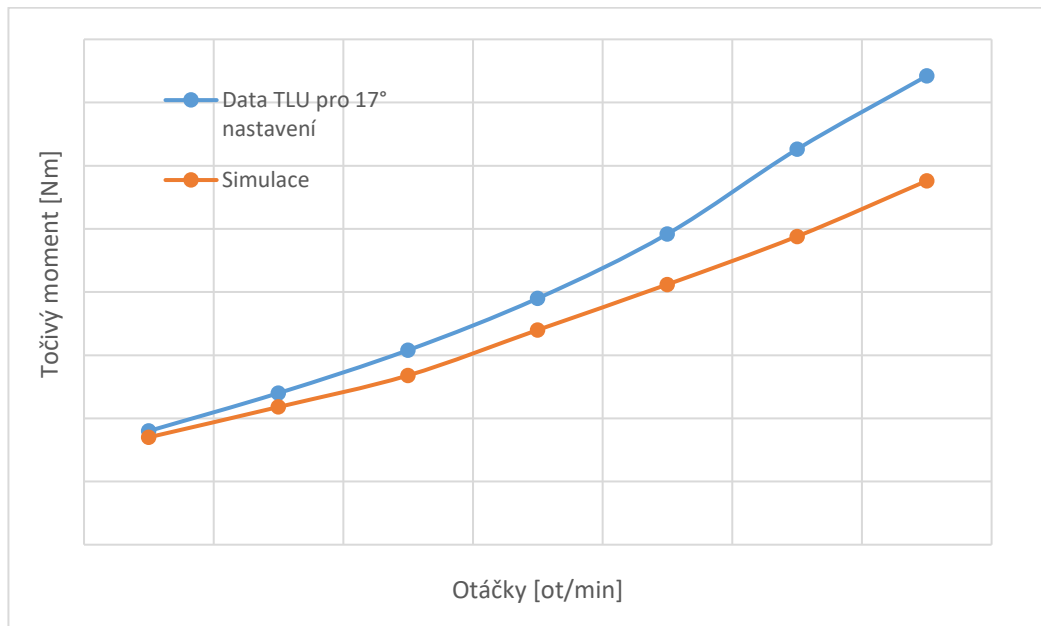
Pro ověření simulace bylo provedeno přes 30 simulací s různým nastavením otáček, úhlu nastavení listu, jemnosti sítě i se změnou velikostí rotující domény a okrajových podmínek. Simulovaný tah ovšem ani v jednom nastavení neodpovídá přesně průběhům ze statického testu. Na následujícím obrázku je zobrazen rozdíl oproti tahu ze statických zkoušek pro úhel nastavení 17° podle výkresu (toto nastavení odpovídá 15° v typickém řezu 0,75 R).



Obr. 5.6: Rozdíl hodnot tahu v závislosti na otáčkách simulace a statického testu pro úhel nastavení 17° .

Jak lze ovšem vidět na průběhu tahu v obrázku 5.6, simulované hodnoty do určité míry prokládají hodnoty ze statického testu, primárně maximum a minimum. Další pokusy o optimalizaci sítě nebo nastavení simulace byly proto zavrhnuty. Průběhy kroutícího momentu rovněž s jistou odchylkou (v průměru $\sim 15\%$, viz obrázek 5.7) odpovídají průběhům ze statického testu.

Obdobné výsledky byly obdrženy i ze simulací pro úhel nastavení $14,6^\circ$ a 21° vůči výkresu. Lze tedy, s přihlédnutím k jisté míře nepřesnosti, prohlásit, že simulace je nastavena správně a lze z ní vyvodit některé závěry užitečné pro simulace v letu.



Obr. 5.7: Rozdíl hodnot kroutícího momentu v závislosti na otáčkách simulace a statického testu.

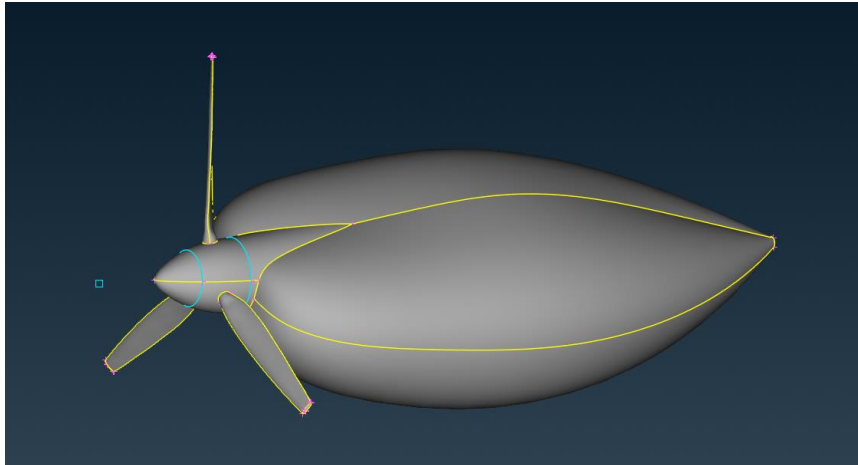
Prvním z těchto závěrů je vliv nastavení $y+$ povrchových prizmatických vrstev vytvořené sítě. Většina statických simulací byla prováděna pro $y+$ hodnotu 1, což odpovídá velikosti první buňky 0,0065 mm pro podmínky na konci listu. Další snížení velikosti mělo minimální vliv na výsledky.

Druhým závěrem je vliv tloušťky rotující domény. Simulace byly prováděny s rotujícím diskem o tloušťce 2 a 4 třetiv listu v 0,75 R. Tloušťka 4 t způsobila značné zvýšení již nepřesných hodnot z obrázku 5.6, jehož hodnoty jsou pro simulace s výškou 2 t .

Tím se potvrdily rovněž závěry z [13], tedy že tloušťka rotující domény má zásadní vliv na výsledné hodnoty simulace a se zvyšující se tloušťkou jsou simulované hodnoty tahu vyšší. Pro další simulace byla proto zvolena tloušťka 2 t .

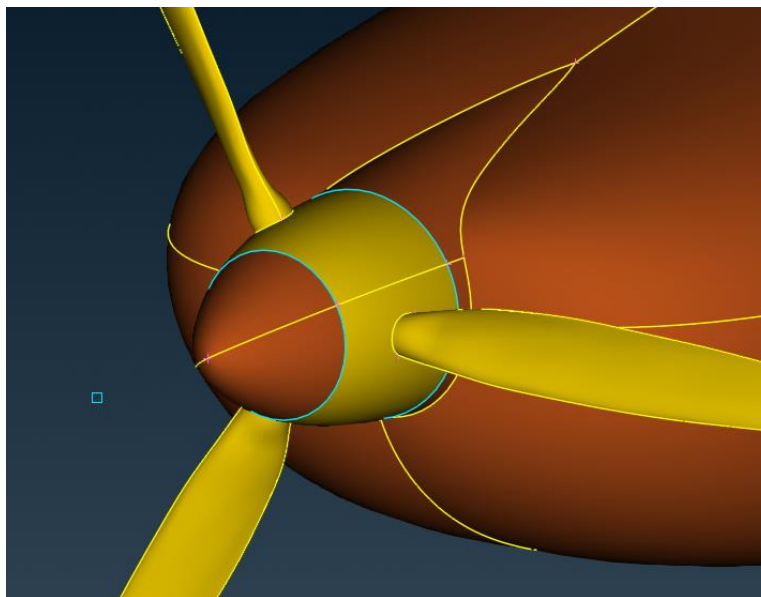
5.4 Síť pro simulace za letu

Se získanými poznatky bylo přistoupeno k simulacím za letu. Velikost okolní simulační domény byla ponechána, stejně tak rozměry rotující domény a rozdělení polí omezujících velikosti buněk. Listy byly usazeny do vrtulového kužele a za vrtuli byl umístěn zjednodušený kryt motoru s kapkovitým zakončením, vytvořený dle mušky letounu Sparker. Zahnutý trup má zásadní vliv na reálnost simulace. Nabíhající vzduch je před trupem zpomalován a tím je značně měněna efektivita řezů listu na vnitřním poloměru oproti nerozrušenému proudu.



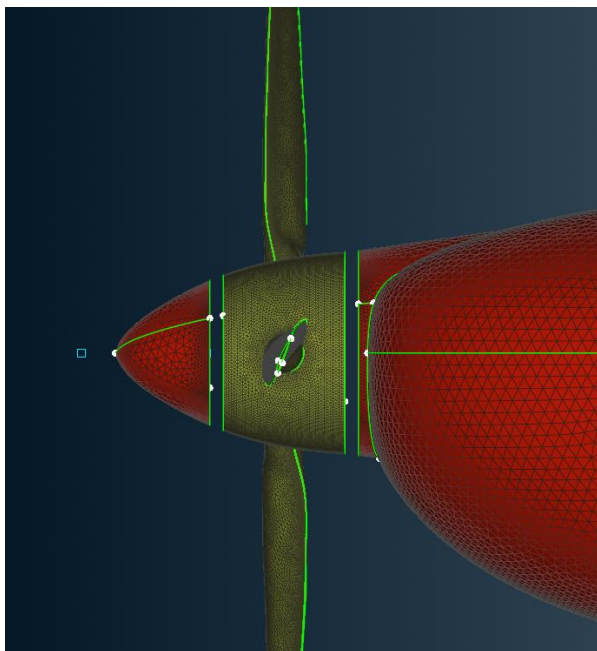
Obr. 5.8: Model se zjednodušeným krytem motoru pro simulace za letu.

Převod tohoto modelu do sítě a funkční simulace byl problematický. V první verzi byl kužel rozdělen na rotující a statickou část, kvůli dodržení tloušťky disku 2 t. Přičemž povrchy vrtule v rotující a statické doméně byly v přímém kontaktu, viz obrázek 5.9. Tato síť ovšem generovala špatné výsledky, konkrétně vycházel negativní tah.



Obr. 5.9: Původní rozdělení rotující a statické části vrtulového kužele.

Hlavním problémem byl nejspíš fakt, že rotující doména protínala povrchy kužele vrtule. Vrtulový kužel byl proto v místě protnutí s rozhraní domén rozdělen. Na obou stranách byla vytvořena mezerka o šířce 20 mm, jejímž středem prochází rozhraní domén. Tím bylo zabráněno chybným simulacím na stěnách u rozhraní bez výrazného narušení nabíhajícího proudu.



Obr. 5.10: Mezera v modelu pro průchod rozhraní domén.

S tímto rozdělením již bylo dosaženo reálných průběhu tahu a momentu. Výsledná síť má 20 milionů buněk, přičemž 7 milionů z toho je tvořeno prizmatickými vrstvami. Rotující doména má celkem 15 milionů buněk.

5.5 Letové režimy

Dalším krokem bylo určení optimálního úhlu nastavení ve zvolených režimech letu. Pro simulace byly vybrány cestovní rychlost, stoupání a maximální horizontální rychlost. Pro tyto režimy byly od TLU zadány rychlosti a otáčky motoru, viz tabulka 5.2.

Tab. 5.2: Zadané podmínky v letových režimech.

Režim letu [-]	Rychlost [km/h]	Otáčky motoru [ot/min]
Stoupání	160	5500
Cestovní	240-250	4800
Maximální rychlost	275	5500

Původním záměrem bylo úhly nastavení určit analyticky, výpočtem přes rychlostní trojúhelník v jednotlivých řezech listu se započítáním interference trupu a indukovaného úhlu náběhu vlivem konečnosti listů. K těmto výpočtům je ovšem třeba znát součinitele vztlaku v řezech. Bylo by možné součinitele určit z 2D simulací. Ovšem vzhledem k faktu, že jsou profily obkreslované z výkresu, nebyly by výsledky přesné.

Navíc není znám konkrétní rozsah úhlů nastavení za letu (10 stupňů, viz tabulka 4.1). Základní úhel vrtule P1 PowerMax není při montáži nastaven geometricky. Místo toho jsou na

zemi pozorovány otáčky při maximálním výkonu motoru, které by měly dosahovat 5550 /min. Pokud otáčky neodpovídají této hodnotě, je vrtule nastavena na větší či menší základní úhel [14].

Proto bylo třeba definovat úhly nastavení pomocí simulace. Pro jednotlivé režimy letu byly vytvořeny sítě s různými úhly nastavení, s krokem 1°. Se sítěmi byly následně provedeny simulace v daných letových podmínkách a byl pozorován moment, který listy vytváří. Nastavení s momentem nejvíce odpovídajícím reálným schopnostem motoru Rotax 912 ULS s daným reduktorem (311 Nm) bylo následně zvoleno jako předloha. Konečná přesnost byla na krok 0,5°. Pro zjednodušení byl reduktor uvažován bez tření.

Tab. 5.3: Zvolené úhly nastavení listů v jednotlivých letových režimech se simulovaným momentem a tahem.

Režim letu	Rychlost	Úhel nastavení v 0,75 R	Moment
[-]	[km/h]	[°]	[Nm]
Stoupání	160	22,5	309
Cestovní	245	31	320
Maximální rychlost	275	28,5	302

5.6 Mesh dependence study

V této podkapitole jsou shrnuty zkoumané vlivy různých změn sítě či nastavení simulace. Některé jsou již zmíněné výše v kapitole 5.3, pro úplnost jsou zde zopakovány.

Ve statických i letových simulacích byly porovnány různě zadané okrajové podmínky stran válce hlavní výpočetní domény. Strany válce byly nastaveny jako stěna, tlakový vstup a výstup ve statických simulacích a tečný rychlostní vstup v letových. U všech těchto simulací byly výsledky totožné a nastavení tedy nemá na simulaci vliv.

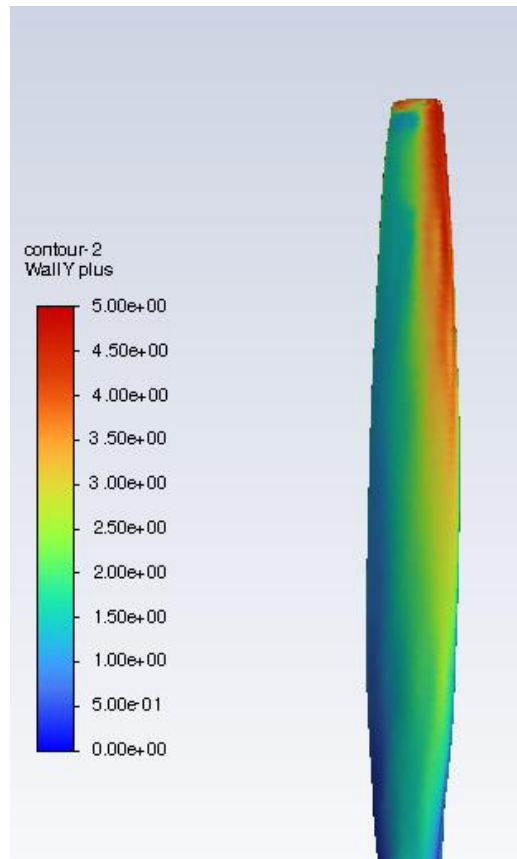
Dále byly provedeny simulace za letu se zvětšenou statickou doménou. Záměrem bylo zjištění, jestli je simulační válec dostatečně velký i pro letové simulace a nedochází k interferencím se vstupem, výstupem či stěnami. Zvětšená doména měla trojnásobný průměr a délku. V simulaci došlo k lehkému nárůstu momentu a tahu, přibližně 3 %. Velikost byla ponechána.

Zásadní vliv na výsledky simulací měla jemnost sítě na listech, primárně na náběžné a odtokové hraně. Původní simulace v letu měly značně hrubě generovanou náběžnou hranu. Po opravě na síť z obrázku 5.5 došlo k výraznému snížení momentu a tahu. Při dalším testování vlivu bylo zjištěno, že u statických simulací k tomuto efektu nedochází.

Co se týče prostorové sítě, byly zkoušeny větší rozměry ‘size boxů‘ pro detailní simulace v okolí vrtule a krytu motoru. Jejich zvětšení mělo za následek značný nárůst počtu buněk bez jakéhokoliv vlivu na výsledky.

Jak bylo řečeno výše, tloušťka rotujícího disku má zásadní vliv na MRF simulace. Vyplývá to ze studií Lodžské univerzity [13] i provedených simulací. Se zvýšením tloušťky

rostou i hodnoty simulovaného tahu. Tloušťka odpovídající délce dvou třetiv v 0,75 R listu generovala optimální výsledky ve srovnání se statickým testem a byla proto ponechána i v simulacích za letu.



Obr. 5.11: $y+$ na horním povrchu listu (náběžná hrana vpravo).

Posledním a již zmiňovaným vlivem je hodnota $y+$ generovaných prizmatických vrstev. Zvoleno bylo $y+$ rovno 1, které odpovídá velikosti první buňky 0,0065 mm v podmínkách 0,75 R listu. Vyšší $y+$ (a tedy větší buňky) již ovlivňovaly simulaci a nižší hodnoty naopak dále již vliv neměly. Generováno bylo 18 prizmatických vrstev.

6 Optimalizace listu

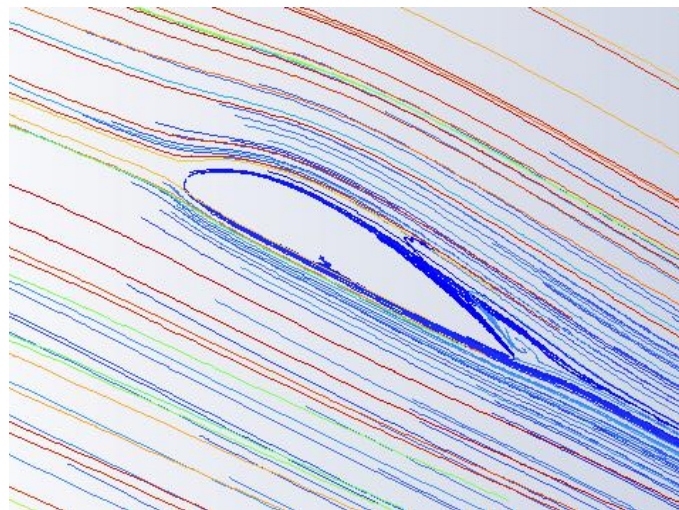
Konkrétní charakteristika na vylepšení nebyla výrobcem zadána. Jako hlavní cíl bylo zvoleno zlepšení vlastností při maximální a případně cestovní rychlosti za zachování charakteristik při stoupání. Zhodnocení přínosu úprav bylo provedeno na základě změn momentu a tahu generovaných vrtulí. Zvolené úpravy jsou popsány v následující kapitole.

6.1 Zkoumané úpravy

Pro optimalizaci listu byl zvolen přístup, kde byly měněny některé geometrické charakteristiky stávajících profilů. Možné by bylo také zvolit profily jiné. Původní profily použité v listech ale nejsou označené, není možné k nim přiřadit konkrétní aerodynamické vlastnosti bez určitých aproximací, a tedy dalších odchylek.

První geometrickou úpravou byla prostá změna tloušťky a šířky jednotlivých řezů listu. Tyto charakteristiky byly zvýšeny a sníženy o 15 % a simulovány pro maximální rychlost. Pokud se ukázaly jako výhodné, byla provedena rovněž simulace na rychlosti cestovní a stoupací.

Další zkoumanou modifikací byla změna zkroucení listu podél jeho délky za zachování geometrie profilů. První úpravou bylo průběžné zvýšení a snížení zkrutu napříč celým listem o 1 °. Tento krok měl za účel vylepšit poznatky o vlivech změn zkroucení na vrtuli. Dále byly provedeny úpravy na základě výsledků simulací původní vrtule při maximální rychlosti, kde bylo zkoumáno proudění podél jednotlivých řezů.



Obr. 6.1: Proudění podél profilu v 0,75 R při maximální rychlosti.

Konkrétně byly zkoumány úhly náběhu řezů v porovnání s vyobrazenými čarami proudění. Úpravy z nich vyvozené ovšem mají jistou odchylku. Za prvé není možné úhel náběhu určit exaktně, protože Fluent neumožňuje jejich konkrétní měření. Je tedy nutné se uchýlit k měření úhlu za pomoci grafických programů. Za druhé bylo zkoumané proudění pro list nacházející se ve vodorovné poloze. Proudění se tedy může lehce lišit v závislosti na

geometrii krytu motoru za listem v daném úhlu natočení. Měření vedlo ke zvýšení úhlů náběhu řezů ve střední části listu, v některých případech až o $1,5^\circ$.

Poslední simulovanou úpravou je šípovitý konec listů. V těchto místech již lokální rychlost přesahuje 0,6 M. Koncový profil byl v tomto případě posunut o 20 % podél těživy



Obr. 6.2: Úprava listu se šípovitým zakončením.

Všechny simulace úprav byly provedeny při stejných podmínkách jako původní listy. Pro zjednodušení popisu v následujícím textu a tabulkách jsou jednotlivým úpravám přiřazeny zkratky, viz následující tabulka. Kořen nebo konec u změny zkrutu značí která část listu zůstává na stejném úhlu náběhu.

Tab. 5.4: Označení jednotlivých úprav listu.

Úprava	Označení v tabulkách
Navýšení tloušťky 15 %	T+15
Snížení tloušťky 15 %	T-15
Navýšení šířky 15 %	L+15
Snížení šířky 15 %	L-15
Zvýšení zkrutu od kořene o 1°	Kořen K+
Zvýšení zkrutu od konce o 1°	Konec K+
Snížení zkrutu od kořene o 1°	Kořen K-
Snížení zkrutu od konce o 1°	Konec K-
Úprava dle čar proudění	Proudnice
Šípovitost na konci listu	Šíp

6.2 Výsledky simulací

Na přání společnosti TL-ULTRALIGHT jsou získané výsledky uvedeny pouze v procentuálních změnách v porovnání s původními listy. Je však nutné zmínit, že tah původních listů odpovídá předpokládaným hodnotám, určených na základě výpočtů z výuky Mechanika letu. Tyto výpočty vychází z učebnice Mechanika letu I – Letové výkony [15].

V následujících tabulkách je přehled získaných výsledků pro maximální, cestovní a stoupací rychlost. Změny tahu a momentu udávají procentuální poměr vůči hodnotám původního listu. Poměr změn udává změnu tahu podělenou změnou momentu. Pokud daná úprava nebyla přínosná na maximální rychlosti, nebyla již dále simulována na rychlostech nižších.

Tab. 5.5: Vliv úprav na maximální rychlosti.

Úprava [-]	Změna momentu [%]	Změna tahu [%]	Poměr změn [-]
L-15	74,17	65,07	0,877
L+15	120,20	124,66	1,037
T-15	110,26	115,07	1,044
T+15	88,74	81,23	0,915
Kořen K-	110,26	109,86	0,996
Konec K-	94,70	93,42	0,987
Proudnice	113,58	115,34	1,016
Konec K+	104,97	106,03	1,010
Kořen K+	89,74	89,18	0,994
Šíp	100,33	100,41	1,001

Tab. 5.6: Vliv úprav na cestovní rychlosti.

Úprava [-]	Změna momentu [%]	Změna tahu [%]	Poměr změn [-]
L+15	118,75	121,02	1,019
T-15	108,44	111,34	1,027
Kořen K-	108,13	107,01	0,990
Proudnice	110,94	110,83	0,999
Konec K+	104,06	104,46	1,004
Kořen K+	91,88	91,21	0,993

Tab. 5.7: Vliv úprav na stoupací rychlosti.

Úprava [-]	Změna momentu [%]	Změna tahu [%]	Poměr změn [-]
L+15	116,18	120,66	1,039
T-15	105,50	108,78	1,031
Kořen K-	106,47	106,12	0,997
Proudnice	108,41	107,86	0,995
Kořen K+	93,53	94,15	1,007
Konec K+	102,91	103,56	1,006

7 Zhodnocení optimalizace

V rámci snahy o optimalizaci vrtule P1 PowerMax byly provedeny výše definované úpravy, simulace a získány uvedené výsledky. V této kapitole jsou popsány vyvozené závěry a omezení zvoleného přístupu optimalizace.

7.1 Zhodnocení výsledků

Ve snaze určit možné vhodné úpravy listů pro maximální letovou rychlost bylo simulováno 10 úprav. Po vyhodnocení přínosů jednotlivých modifikací byly čtyři vyřazeny a dále byly na zbývajících provedeny simulace na cestovní a stoupací rychlosti.

Vyřazené úpravy jsou snížení šířky, zvýšení tloušťky, snížení zkrutu od konce listu (Konec K-) a listy se šípovitostí. Změna šířky a tloušťky mají výrazné negativní následky na poměr generovaného tahu vůči potřebnému krouticímu momentu. Snížení zkrutu od konce má rovněž negativní přínos, byť ne tak výrazný. Podobně je tomu i u úpravy Kořen K-, zde je ovšem snížení tahu vůči momentu minimální. Úprava byla tedy dále ponechána pro další simulace. Poslední vyřazená modifikace se šípovitostí nejevila žádné negativní ani pozitivní změny.

Jak lze vidět z tabulek, všechny ponechané úpravy ovlivňují tah a moment obdobným způsobem. Tah i moment stoupají nebo klesají často o prakticky totožná procenta. V hodnotách poměru změn je vidět, že se často neliší o více jak 3 %. Provedené úpravy mají obdobný vliv i na nižších rychlostech, ovšem se snižující se intenzitou změny tahu a momentu.

U některých úprav měřené veličiny stoupají o vysoké hodnoty, až 25 %. Je nutné zmínit, že takovéto úpravy nejsou nutně nekorektní. Vrtule je typu constant-speed a byla by schopna se při dané úpravě nastavit na vhodnější úhel a otáčky tak, aby byl vyrovnán točivý moment. Bohužel není možné v rámci této práce toto nastavení určit.

Nejúspěšnější úprava, co se týče optimalizace na maximální rychlost, se jeví úprava na základě zkoumání úhlů náběhu v proudu. Stále dochází ke značnému nárůstu momentu společně s tahem. Ovšem při srovnání poměrů tahu a momentu za různých rychlostí (1,016 na maximální, 0,999 na cestovní a 0,995 na stoupací) lze vidět, že takto upravená vrtule se nejlépe chová při maximální rychlosti. Ovšem při rychlostech nižších již je efekt negativní.

Snížení tloušťky a navýšení šířky listů přináší pozitivní navýšení tahu na všech rychlostech. Při těchto úpravách je ovšem třeba brát v potaz rovněž soudržnost a dynamické chování listů. Například ztenčení listů by mohlo mít zásadní vliv na pevnost a aeroelastické vlastnosti. Zvýšení šířky může způsobit navýšení odstředivých sil a vytvářet nechtěné vibrace.

Poslední úpravou s pozitivními výsledky je navýšení krutu od konce listu (tedy navýšení úhlů náběhu v kořenové části). Zde je vůči ostatním modifikacím změna tahu a momentu výrazně nižší.

Ve výsledku ani jedna z úprav neskýtá vskutku očividný přínos. V žádném případě nedošlo např. ke zvýšení tahu bez výrazného navýšení momentu nebo podobnému vývoji. Je tedy možné prohlásit, že vrtule je vhodně optimalizována pro dané rychlosti při současných schopnostech motoru.

To lze vyvodit i z porovnání zvýšení a snížení sil při změnách stejné geometrie. Například, snížení tloušťky navýší tah o 15 %, zatímco zvýšení tloušťky sníží tah o téměř 19 %. Tento vývoj, kdy je negativní změna procentuálně významnější, lze pozorovat u všech dvojic změn (navýšení a snížení šířky, zvýšení a snížení zkrutu od kořene či od konce). Na základě toho lze prohlásit že zkoumané charakteristiky (zkroucení, šířka a tloušťka) jsou na vrtuli zvolené vhodně. Při pokusu o navýšení tahu není efekt tak výrazný, zatímco v opačném směru jsou ztráty vyšší.

Nabízejí se další možné pokusy o optimalizaci. Jednou z možností je snaha o navýšení rychlosti na některém z letových režimů. Dále by bylo možné simulovat kombinace zde uvedených změn.

Získané hodnoty však nejsou zcela exaktní. Do výsledků je vnesena jistá úroveň chyby. Simulace má lehce pulsující charakter. Bylo tedy nutné brát průměr hodnot z alespoň několika stovek iterací po ustálení simulace. Rozdíly ve výsledném tahu a momentu jsou však jasně viditelné a chyba vinou zaokrouhlení by měla být minimální.

Dalším faktorem je mezera v kuželu vrtule vytvořená pro správnou funkci simulace. Její vliv by neměl být zásadní pro vytvořené hodnoty. Zvláště pak v případě optimalizace, kdy jsou srovnávány výkony za stejných podmínek se stejnou mezerou. Stále se ovšem jedná o nepřesnost vnesenou do simulace.

7.2 Omezení spojené se zvoleným přístupem k optimalizaci

Během pokusů o optimalizaci listů se ukázalo, že analýza pouze na základě Fluentu je nedostačující. Úvodně byla v plánu detailní analýza proudění podél stávajících listů, nalezení případných odtržení, turbulencí či jiných nedokonalostí způsobených geometrií listů. Následně by byla provedena úprava. Žádné takové nedostatky však nalezeny nebyly. Jediná úprava, kde byl tento přístup zkoušen (úprava podle proudění podél listů) se ukázala jako nepříliš účinná.

Zásadní pro ulehčení optimalizace a snížení výpočetního času by byl analytický výpočetní model se započtením vlivů krytu motoru a indukovaného úhlu na konci listů. Analytický model by výrazně snížil množství nevhodných zkoumaných úprav a urychlil by celkový proces. Rovněž by umožnil dané úpravy následně ověřovat na vhodnějších rychlostech za vhodných otáček a úhlu nastavení.

Původním záměrem této práce bylo zkoumat optimalizovanou vrtuli s pomocí některé z teorií uvedených výše (to je rovněž příčinou rozsáhlé teoretické části), ideálně vírové teorie. Bylo však rozhodnuto, že úpravy budou ověřovány formou CFD. Práce s novými programy, vytváření a optimalizace sítí a snaha o korekci simulací statických testů byly značně časově náročné. Na samotnou optimalizaci vrtule tedy zbyl omezený čas a nebylo již možné analytický model vytvořit.

8 Závěr

V rámci této práce byla provedena analýza a snaha o optimalizaci listů constant-speed vrtule P1 PowerMax od společnosti TL-ULTRALIGHT. Hlavní cíle práce byly splněny v těchto kapitolách:

- zhodnocení výkonových parametrů stávající vrtule (kapitola 4)
- početní analýza a stanovení teoretických výkonových parametrů (kapitola 5)
- optimalizace vrtulových listů s ohledem na technologii výroby a jejich návrh (kapitola 6)
- zhodnocení přínosů optimalizace (kapitola 7)

První tři kapitoly práce se zabývají teoretickým úvodem. Popsány jsou principy funkce leteckých vrtulí, jejich kategorizace, výkonové charakteristiky a aerodynamické vrtulové teorie.

Praktická optimalizační část je řešena za pomoci CFD simulací, konkrétně MRF (multiple reference frame) metodou. Při této metodě je síť rozdělena na dvě části, přičemž geometrie listů je uložena v tenkém rotujícím disku. MRF metoda výrazně urychluje a zjednodušuje simulaci, ovšem není exaktní.

V rámci prvních dvou cílů práce byly provedeny simulace statických testů za účelem ověření korektnosti simulace. Výsledky simulací neodpovídaly přesně hodnotám tahu z testů. Simulované hodnoty tahu jsou ovšem ve stejných řádech a vhodně prokládají výsledky testu. Kroutící moment má průběhy prakticky totožné s jistou odchylkou. Další pokusy o optimalizaci tedy nebyly prováděny. Statické simulace byly rovněž užitečné pro průzkum vlivů jemnosti a rozdělení simulační sítě. V případě MRF simulací je například zásadní tloušťka rotující domény.

Pro optimalizaci listů byla vytvořena síť se zjednodušeným modelem krytu motoru za vrtulí. Zde bylo nutné rozdělit model v místě rozmezí rotující a statické části sítě pro správný průběh simulace. Konkrétní charakteristiky k optimalizaci nebyly výrobcem zadány, byla proto zvolena snaha o vylepšení výkonů při maximální a případně cestovní rychlosti za zachování výkonů při stoupání.

Úhly nastavení listů pro jednotlivé letové režimy nejsou známy, bylo je proto třeba určit za pomoci simulací. Za daných letových podmínek byly simulovány různé úhly nastavení s daným krokem. Úhel nastavení generující točivý moment, který je motor s reduktorem (Rotax 912 ULS) schopen unést, byl zvolen pro daný letový režim.

Následné pokusy o optimalizaci byly provedeny změnou geometrie listů. Konkrétně se jednalo o změny tloušťky listů, šířky a zkrutu listů. Bylo vytvořeno 10 úprav, 4 z nich byly vyřazeny ihned po simulacích na maximální rychlosti. Ze zbývajících úprav dosahují nejlepších výsledků navýšení šířky a tloušťky listu, úprava podle průřezu proudění podél původního listu a lehké navýšení úhlu náběhu v kořeni listu.

Všechny tyto úpravy ovšem zároveň s tahem navyšují kroutící moment generovaný vrtulí. Ve výsledku není navýšení tahu nikdy vyšší než o 4,4 % vůči momentu. Bohužel v rámci této práce není možné ověřit, zda by daná úprava byla výhodnější při podmínkách vhodného nastavení, které by zajistila constant-speed vrtule.

Na základě zkoumání vrtule ve Fluentu a získaných změn tahu a momentu bylo vyvozeno, že vrtule je vhodně konstruována pro dané letové podmínky. Možností pro další optimalizace by tedy mohlo být například navýšení maximální či cestovní rychlosti.

S přihlédnutím na množství a úspěšnost provedených simulací se ukazuje, že pro zpřesnění a urychlení optimalizace by bylo vhodné do procesu zavést analytický výpočetní model, založený na některé z aerodynamických vrtulových teorií. To bylo rovněž původním záměrem této práce. Ten byl ovšem pozměněn na ověřování za pomoci CFD. Vzhledem k úvodní neznalosti programů sloužících k vytváření sítí a simulací a dlouhého času stráveného snahou o korekce chyb v simulacích, nebylo možné analytický model vytvořit.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ALEXANDROV, Vladimír Leontjevič. *Letecké vrtule*. První vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954.
- [2] *Sensenich* [online]. [21. 1. 2023]. Dostupné z: <https://www.sensenich.com>
- [3] WEICK, Fred Ernest. *Aircraft propeller design*. First edition. New York a Londýn: MCGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1930.
- [4] MCCORMICK, Barnes Warnock. *Aerodynamics, aeronautics, and flight mechanics*. 2nd ed. New York: Wiley, 1995. ISBN 978-0-471-57506-1.
- [5] GUDMUNDSSON, Snorri. *General aviation aircraft design: applied methods and procedures*. First edition. Oxford; Waltham, MA: Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-12-397308-5.
- [6] PICCIRILLO, Albert C. The Clark Y Airfoil: A Historical Retrospective. In: *2000 World Aviation Conference*. San Diego, CA: AIAA, 2000.
- [7] *Aerocorner* [online]. [4. 12. 2022]. Dostupné z: <https://aerocorner.com/blog/types-of-aircraft-propellers/#1-fixed-pitch>
- [8] HITCHENS, F. E. *Propellor aerodynamics: the history, aerodynamics & operation of aircraft propellers*. Luton: Andrews UK Limited, 2015. ISBN 978-1-78538-211-6.
- [9] *E-Props* [online]. [21. 1. 2023]. Dostupné z: <https://aircraft.e-props.fr>
- [10] GLAUERT, Hermann. Airplane Propellers. In: *Aerodynamic Theory*. První vydání. Berlín: Springer Berlin Heidelberg, 1935. ISBN 978-3-642-89630-9.
- [11] *TL-ULTRALIGHT* [online]. [7. 3. 2023]. Dostupné z: <https://www.tl-ultralight.cz>
- [12] *FlyRotax* [online]. [14. 5. 2023]. Dostupné z: <https://www.flyrotax.com>
- [13] STAJUDA, Mateusz, Meciej KARCZEWSKI, Damian OBIDOWSKI a Krzysztof JÓŹWIK. Development of a CFD model for propeller simulation. *Mechanics and Mechanical Engineering*. nedatováno, 2016(4).
- [14] *Uživatelská a instalační příručka elektricky stavitelné letecké vrtule PowerMax* [online]. B.m.: TL-ULTRALIGHT s.r.o. 2012. Dostupné z: <https://www.tl-ultralight.cz/cs/soubory-ke-stazeni>
- [15] DANĚK, Vladimír. *Mechanika letu. I, Letové výkony*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-7204-659-1.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
ω	Úhlová rychlost	[rad/s]
A	Průmětné plocha proudové trubice	[m ²]
a	Sklon vztlakové čáry profilu	[1/rad]
b	Délka tětiny listu	[-]
B	Počet listů vrtule	[-]
\bar{b}	Poměrná šířka	[m]
c	Délka tětiny listu	[m]
c_d	Součinitel odporu	[-]
c_l	Součinitel vztlaku	[-]
C_P	Součinitel výkonu	[-]
C_T	Součinitel tahu	[-]
D	Průměr vrtule	[m]
dD	Inkrement odporu	[N]
dL	Inkrement vztlaku	[N]
dQ	Inkrement momentu	[Nm]
dr	Délka řezu listu	[-]
dT	Inkrement tahu	[N]
F	Součinitel ztráty na konci listu	[-]
J	Postupové číslo	[-]
M	Machovo číslo	[M]
n	Otáčky	[ot/s]
p	Stoupání vrtule	[m]
p	Tlak	[Pa]
P	Výkon	[W]
r	Poloměr	[m]
R	Poloměr vrtule	[m]
\bar{r}	Poměrný poloměr	[-]
S	Průmětná plocha výpočetního válce	[m ²]
t	Tloušťka řezu listu	[m]
T	Tah	[N]
\bar{t}	Poměrná tloušťka	[-]

Symbol	Veličina	Jednotka
V	Rychlost	[m/s]
V_∞	Rychlost nabíhajícího proudu	[m/s]
V_e	Výsledná rychlost listu	[m/s]
w	Rychlost indukovaná vrtulí	[m/s]
w_a	Axiální složka indukované rychlosti	[m/s]
w_t	Tečná složka indukované rychlosti	[m/s]
α	Úhel náběhu	[°]
α_i	Indukovaný úhel náběhu	[°]
β	Úhel nastavení	[°]
Γ	Cirkulace	[-]
ΔQ	Změna průtoku	[m ³ /s]
η	Účinnost	[-]
ρ	Hustota vzduchu	[kg/m ³]
Φ	Úhel pohybu elementu listu	[°]
Φ_T	Úhel sklonu vírové šroubovice na konci listu	[°]

Zkratky

<i>BET</i>	Blade element theory
<i>CFD</i>	Computational fluid dynamics
<i>MRF</i>	Multiple reference frame
<i>NACA</i>	National Advisory Committee for Aeronautics
<i>VTOL</i>	Vertical take-off and landing

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1.1 Vrtule od amerického výrobce Sensenich Propellers [2]
Obr. 1.2 Vznik profilu listu [1]
Obr. 1.3 Rychlostní trojúhelník řezu listu [1]
Obr. 1.4 Typická pevná dvoulistá dřevěná vrtule se zobrazením jednotlivých řezů [3]
Obr. 1.5 Možný průběh geometrických charakteristik podél listu [4]
Obr. 1.6 Šípovité listy vrtule pro zvýšení kritického Machova čísla [5]
Obr. 1.7 Typický profil vrtulového listu [1]
Obr. 1.8 Profil Clark Y [6]
Obr. 1.9 Profil NACA 16-012 [5]
Obr. 1.10 Typický příklad pevné dřevěné vrtule [7]
Obr. 1.11 Vrtule stavitelná na zemi [1]
Obr. 1.12 Schéma elektricky řízené stavitelné vrtule [1]
Obr. 1.13 Řez vrtulí typu constant-speed [7]
Obr. 1.14 Příklad vrtule nastavené do praporu na letounu CASA CN 235 [8]
Obr. 1.15 Řez kompozitním listem vrtule [9]
Obr. 2.1 Idealizovaný proud dle hybnostní teorie [4]
Obr. 2.2 Přední pohled na vrtuli s vyznačeným elementem listu [4]
Obr. 2.3 Element listu, pohled do středu vrtule [4]
Obr. 2.4 Veličiny pro výpočet rovnice 2.21 [4]
Obr. 2.5 Nahrazení nosné plochy soustavou vírů dle Žukovského [1]
Obr. 2.6 Zobrazení složek indukované rychlosti na listu [4]
Obr. 3.1 Křivky součinitele tahu pro různé úhly nastavení vrtule 5868-R6 [4]
Obr. 3.2 Křivky součinitele výkonu pro různé úhly nastavení vrtule 5868-R6 [4]
Obr. 3.3 Křivky účinnosti vrtule pro různé úhly nastavení vrtule 5868-R6 [4]
Obr. 4.1 Vrtule P1 PowerMax na letounu Sting S4 [11]
Obr. 4.2 Vrtule P1 PowerMax při statické zkoušce v tlačném uspořádání
Obr. 4.3 Průběhy tahu v závislosti na otáčkách pro různé úhly nastavení vrtule P1
Obr. 4.4 Model vrtule s trojúhelníkovým uložením dle statického testu
Obr. 5.1 Možné provedení metody MRF s využitím periodicity: a) celá výpočtová doména, b) detail rotující domény [13]
Obr. 5.2 Úprava jemnosti sítě statické domény v okolí a v úplavu vrtule
Obr. 5.3 Síť na rozhraní rotující a statické domény
Obr. 5.4 Detail prizmatických vrstev na povrchu listu
Obr. 5.5 Detail sítě na odtokové (vlevo) a náběžné hraně (vpravo)
Obr. 5.6 Rozdíl hodnot tahu v závislosti na otáčkách simulace a statického testu pro úhel nastavení 17°
Obr. 5.7 Rozdíl hodnot kroutícího momentu v závislosti na otáčkách simulace a statického testu
Obr. 5.8 Model se zjednodušeným krytem motoru pro simulace za letu
Obr. 5.9 Původní rozdělení rotující a statické části vrtulového kužele
Obr. 5.10 Mezera v modelu pro průchod rozhraní domén
Obr. 5.11 y_+ na horním povrchu listu (náběžná hrana vpravo)

- Obr. 6.1 Proudění podél profilu v 0,75 R
Obr. 6.2 Úprava listu se šípovitým zakončením