



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

**NÁVRH SKLOPNÉ VRTULE PRO BEZPILOTNÍ
PROSTŘEDKY**

DESIGN OF FOLDING PROPELLER FOR UAVS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radovan Dítě

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Robert Popela, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Letecký ústav
Student:	Bc. Radovan Dítě
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Stavba letadel
Vedoucí práce:	Ing. Robert Popela, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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:

Návrh sklopné vrtule pro bezpilotní prostředky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

S globálním rozvojem bezpilotních letounů (UAV) rostou požadavky na jejich výkony, především maximální vzletovou hmotnost (MTOW), cestovní rychlost a výdrž –pracovní čas. Výkon bezpilotního letounu je určen systémem pohonných jednotek se zdroji el. energie a vrtulemi. Tyto vrtule mohou dosahovat značných rozměrů a zvětšovat tak rozměry celého letounu. Jedním z řešení tohoto nežádoucího jevu je tzv. sklopná vrtule, která je složena z unašeče a jednotlivých listů, které lze sklápět. Dochází tak k redukci rozměrových požadavků, především při transportu a skladování letounu. Sklopná vrtule sebou však přináší řadu komplikací, především vibrace, které významně ovlivňují její výkon. Cílem této diplomové práce je vytvořit co nejefektivnější sklopnou vrtuli pro konkrétní letoun.

Cíle diplomové práce:

Provést podrobnou analýzu již vyrobených sklopných vrtulí.

Navrhnout vlastní design listu vrtule, popřípadě unašeče. Vyrobit a otestovat navrženou vrtuli. Vyvodit závěry z testů a navrhnout metodický postup pro návrh vrtule daných rozměrů

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 2018/19

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem sklopné vrtule pro bezpilotní prostředky. Na základě teoretických poznatků, a především podrobné analýzy již existujících sklopných vrtulí, byl vytvořen návrh sklopné vrtule. Tato vrtule byla posléze vyrobena a otestována. Součástí práce je i návrh centrálního unašeče vrtule. Závěr je tvořen návrhem metodického postupu pro návrh sklopných vrtulí těchto rozměrů.

KLÍČOVÁ SLOVA

vrtule, centrální unašeč, UAV, multikoptéra, teorie elementu listu, vibrace

ABSTRACT

This master's thesis deals with the design of foldable propeller for UAVs. The design of the foldable propeller is created based on theory of propellers and also on the detail analysis of existing foldable propellers with similar dimensions. The propeller is then manufactured and tested. One of the parts of this thesis also describes the design of the central hub. At the end, the methodical procedure of creating foldable propellers is suggested.

KEYWORDS

propeller, central hub, UAV, multicopter, Blade Element Theory, vibration

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DÍTĚ, Radovan. *Návrh sklopné vrtule pro bezpilotní prostředky* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117609>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Robert Popela.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma *Návrh sklopné vrtule pro bezpilotní prostředky* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne

.....

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Robertu Popelovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, cenné rady a vstřícnost během tvorby celé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat svým nejbližším a rodině za ohleduplnost a neustálou podporu.

OBSAH

Úvod.....	15
1 Základní teorie vrtule.....	16
1.1 Použití a účel vrtule	16
1.2 Základní vztahy a pojmy.....	16
1.3 Základní charakteristiky vrtule	20
1.3.1 průměr vrtule D	20
1.3.2 šířka listu b	20
1.3.3 tloušťka listu t	21
1.3.4 úhel nastavení profilu listu φ	21
1.3.5 zkroucení listu	22
1.4 Vrtulové profily	23
2 Aerodynamika vrtule	26
2.1 Hybnostní Teorie	26
2.2 Teorie elementu listu	29
2.3 Proud vzduchu kolem vrtule při visu.....	32
2.4 Zatížení vrtule a výkonové zatížení	33
3 Dynamika vrtule	34
3.1 Síly a momenty působící na vrtuli	34
3.2 Hluk vrtule	38
3.2.1 Snížení hluku vrtule.....	38
4 Vyvažování vrtule.....	39
4.1 Statické vyvažování	40
4.2 Dynamické vyvažování.....	40
5 Analýza současného stavu	41
5.1 Rozměrové a hmotnostní charakteristiky.....	43
5.2 Geometrie listu.....	44
5.3 Výkonové charakteristiky	44
6 Analýza pohybu vrtule.....	52
6.1 Digitální korelace obrazů.....	52
6.1.1 Princip digitální korelace.....	52
6.2 Výsledky analýzy pohybu vrtule	53
7 Návrh vrtule.....	62
7.1 Mecaflux Heliciel	62
7.2 Volba profilu listu	63
7.3 Model listu	66

7.4	Výroba listu vrtule.....	70
7.5	Vyvažování.....	71
7.6	Odchylka simulace	74
7.7	Dynamická analýza	75
7.8	Silové zatížení listu	77
7.9	Modální analýza	78
8	Centrální unašeč.....	80
9	Metodický postup návrhu sklopné vrtule.....	82
	Závěr	83
	Seznam použitých zdrojů	85
	Seznam použitých symbolů a zkratk	86
	Sznam obrázků.....	88
	Seznam tabulek	90
	Seznam grafů.....	91
	Seznam příloh	92
	Přílohy.....	93

ÚVOD

Obrovským trendem dnešní doby jsou, a stále více se stávají, bezpilotní letouny (UAV – Unmanned Aerial Vehicle), které jsou používány pro široké spektrum aktivit a činností. Od transportu nákladu, přes údržbu a monitoring špatně přístupných oblastí, až po ošetřování zemědělských ploch nebo dokonce k vojenským misím. Potenciál těchto zařízení je obrovský a se zdokonalováním technologií stále roste. Spousta světových, nejen leteckých, společností momentálně pracuje na vývoji bezpilotního letounu pro přepravu lidí, který by radikálně změnil způsob cestování. Nejen, že by se výrazně zkrátila doba cestování na krátké a středně dlouhé vzdálenosti, ale zároveň by došlo k výrazné redukci zatížení životního prostředí, které je při aktuální spotřebě fosilních paliv enormní.

Pohonný systém naprosté většiny UAV je totiž tvořen vrtulí a elektromotorem, který je napájen z akumulátoru, ve kterém je uložena elektrická energie, která je ve srovnání s energií z fosilních paliv dostupnější, levnější a ekologičtější. Vrtule generuje tah potřebný pro vzlet, manévrování a následné bezpečné přistání UAV. Elektromotorem je ve většině případů bezkartáčový stejnosměrný motor, který vykazuje vysokou efektivitu, spolehlivost a současně nízkou hladinu hluku a elektromagnetického rušení.

S rostoucími požadavky na větší platící zatížení nebo delší letové časy, rostou i požadavky na výkony a účinnost pohonných systémů. Efektivita a výkon (generovaný tah) vrtule jsou výrazně ovlivněny průměrem vrtule, proto je snahou jej stále zvětšovat. S rostoucími rozměry vrtule však rostou i rozměry celého zařízení a výrazně se komplikuje způsob přepravy UAV. Velmi často musejí být vrtule během transportu ze zařízení sejmuty, což následně výrazně prodlužuje čas uvedení UAV do provozu. To je však, především v případě záchranných nebo lékařských misí, velice nežádoucí. Řešením tohoto problému může být aplikace rychloupínacího zařízení, které umožní snadnou a rychlou instalaci a demontáž vrtule ze zařízení. Nevýhodou tohoto řešení je nárůst celkové hmotnosti, způsobené přidáním potřebných částí rychloupínacího zařízení na motor a vrtuli. Dalším možným řešením je sklopná vrtule, která zůstává nainstalována na zařízení i během transportu, jelikož může být sklopena a její rozměr je tak výrazně redukován. Tento koncept navíc udržuje zařízení v neustálém pohotovostním režimu. Bohužel i toto řešení skýtá několik nevýhod, jedná se především o nižší efektivitu vrtule a výraznější vibrace při jejím provozu, tyto negativa budou řešeny v této diplomové práci.

Práce je rozdělena do čtyř hlavních bloků. Pro detailní porozumění problematice vrtule je první část věnována teorii vrtule a problematice s ní spojenou. V této části je popsána obecná charakteristika vrtule, aerodynamika vrtule, dynamické zatížení vrtule a problematika vyvažování vrtule. Druhá část práce je zaměřena na podrobnou analýzu již existujících sklopných vrtulí daných rozměrů. Postupně je zkoumána geometrie dílčích listů, výkony jednotlivých vrtulí a deformace listu při dynamickém zatížení. V třetí části je pak na základě popsané teorie a provedených analýz vytvořen vlastní návrh listu a unašeče. Tato navržená vrtule je následně vyrobena, testována a porovnávána s ostatními sklopnými vrtulemi. Poslední blok této práce je tvořen návrhem metodického postupu pro návrh sklopných vrtulí daných rozměrů a závěrem, ve kterém je zhodnocen celý proces návrhu vrtule.

Tato práce je tvořena ve spolupráci s firmou Mejlík Propellers s.r.o., která se zabývá výrobou a prodejem vrtulí. Společnost zatím ve svém produktovém portfoliu sklopné vrtule pro menší UAV nenabízí, takže by pro ni mohl být případný fungující prototyp sklopné vrtule velice prospěšný. Společnost by pak totiž mohla výrazně rozšířit svůj podíl na trhu, na kterém je poptávka právě po sklopných vrtulích obrovská.

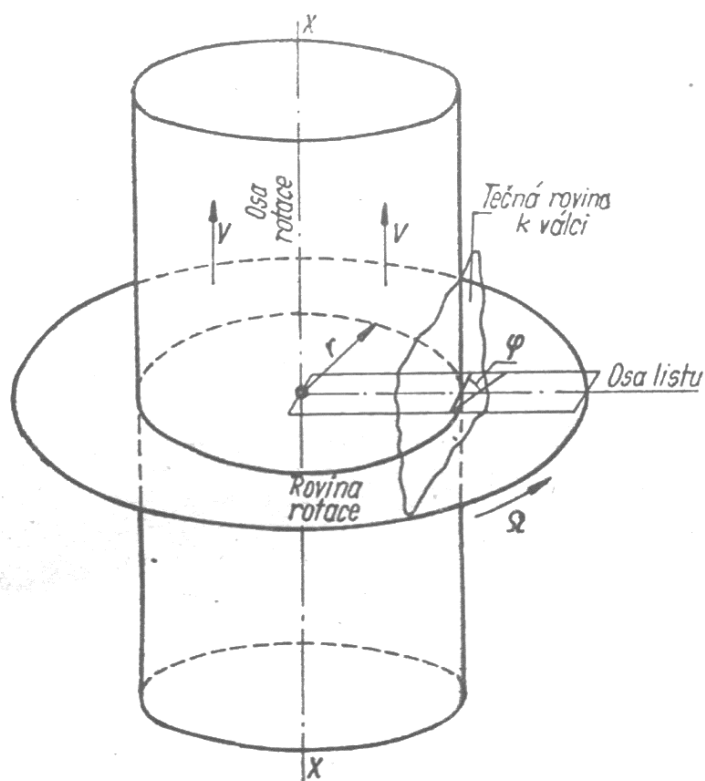
1 ZÁKLADNÍ TEORIE VRTULE

1.1 POUŽITÍ A ÚČEL VRTULE

Pro udržení letounu ve vzduchu a k jeho letu zvoleným směrem, je potřeba vynaložit určitou energii. Většinou se jedná o energii motoru, který pohání vrtuli a ta tak koná práci při posuvném pohybu letounu. Vrtule je aplikována všude tam, kde je vůči ostatním způsobům získávání tahu výhodnější. Jelikož je vrtule nejpoužívanějším generátorem tahu v letectví, blíže její vývoj a zlepšování souvisí s vývojem samotných letadel. Vrtule se používá také u vrtulníků, kde současně tvoří hlavní zdroj vzlaku. V dnešní době jsou vrtule hojně používány i u stále se rozšiřujících bezpilotních letounů (UAV), kde u naprosté většiny tvoří řešení pohonného systému zařízení [1].

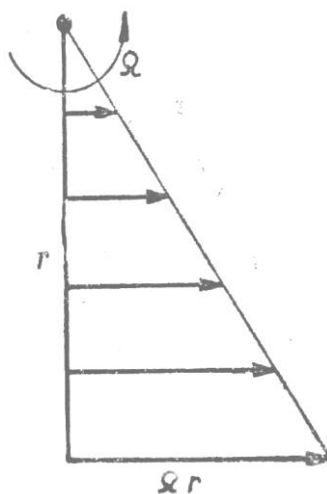
1.2 ZÁKLADNÍ VZTAHY A POJMY

Vrtule generuje tah obdobným způsobem jako nosná plocha letadla, která však koná jen pohyb posuvný, zatímco pohyb vrtule je složen z pohybu rotačního a posuvného. Zjednodušený tvar listu si můžeme představit jako protáhlý obdélník, jehož délka je ve srovnání s šířkou dominantní. Dále uvažujme, že vrtulový list rotuje s úhlovou rychlostí Ω kolem osy x , která protíná kratší stranu obdélníku. Jelikož není rovina obdélníka totožná s rovinou rotace, označíme jejich vzájemné natočení úhlem φ . Obdélník současně koná translační pohyb ve směru osy rotace x s rychlostí v . Provedeme-li řez vrtulového listu válcem o poloměru r , jehož osa je totožná s osou rotace x , obdržíme protáhlý obdélník. Z důvodu zakřivení řezu způsobeného zakřivením válce, je válcový řez nahrazen řezem tečné roviny válce. Výsledkem je řez listu vrtule, který se minimálně liší od skutečného řezu listu a umožňuje jeho snadnější prokreslení. Určeme nyní směr nabíhajícího proudu vzduchu na tento řez [1].



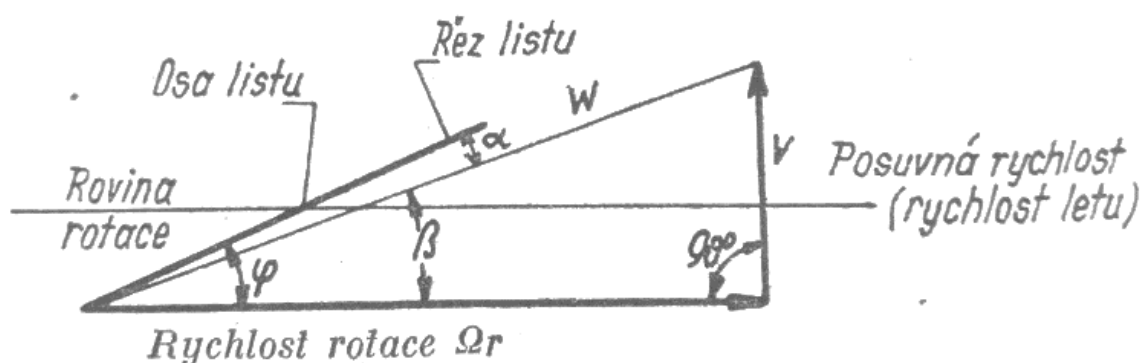
Obrázek 1 Vznik profilu listu [1]

Jelikož je pohyb vrtulového listu obecný, složený z pohybu rotačního a translačního, musíme tyto složky pohybu skládat. Translační rychlost je určena vektorem rychlosti letu v a obvodová rychlost, určená rotací, je rovna Ωr , obě tyto rychlosti jsou na sebe kolmé. Vektorový součet těchto dvou složek označíme w . Vzniká úhel α , který svírá nabíhající proud vzduchu s listem vrtule v daném řezu. Tento úhel bývá většinou menší než úhel φ . Budeme-li měnit vzdálenost řezu listu od osy rotace, zůstává složka translační rychlosti výsledného pohybu totožná, ale obvodová rychlost Ωr se bude lineárně měnit. Ve středu rotace je tato rychlost nulová [1].



Obrázek 2 Lineární průběh obvodové rychlosti podél vrtulového listu [1]

Za předpokladu, že je vrtulový list rovinný, je úhel φ po celé délce listu konstantní, ale úhel náběhu α se v jednotlivých řezech mění, jelikož se s poloměrem mění i obvodová rychlost. S rostoucím poloměrem r se úhel α zvětšuje. Z teorie aerodynamiky víme, že nosná plocha generuje tím více tahu, čím větší je úhel náběhu α . Nejvýhodnější hodnoty jsou pro maximální možný poměr součinitele vztlaku a součinitele odporu c_L/c_D , tedy při maximálním dosažení tahu a zároveň nejmenší spotřebě energie. Z této teorie vyplývá, že pro maximální účinnost vrtule je nutné, aby jednotlivé řezy vrtulového listu měly co nejvýhodnější úhel náběhu, tedy aby se úhel φ podél poloměru měnil, s rostoucí vzdáleností od osy rotace by se měl zmenšovat. Na základě aerodynamických požadavků se používají listy vrtulí, které mají řezy listu totožné s nosnými plochami letadel [1].



Obrázek 3 Rychlostní trojúhelník řezu listu [1]

Vrtule může být tvořena jedním, dvěma, třemi, čtyřmi nebo vícero listy. Jednolistá vrtule se však téměř nepoužívá, jelikož musí být opatřena vyvažovacím závažím a nemá žádné další aerodynamické či konstrukční výhody [1].

Vrtule slouží k přeměně energie, podle druhu této přeměny rozlišujeme tyto tři možnosti:

1. Energie motoru je přeměněna v práci, která je příslušná posuvnému pohybu letounu
2. Energie motoru je přeměněna v pohybovou energii hnacího proudu vzduchu
3. Transformace energie pohybujícího se vzduchu na mechanickou práci [1]

Pro první možnost přeměny energie platí, že výkon na hřídeli motoru, který můžeme vyjádřit součinem kroutícího momentu a úhlové rychlosti $M\Omega$, se mění na výkon posuvného pohybu letadla, který definujeme jako součin tahu vrtule T a její posuvné rychlosti v . Vrtule je v tomto případě zdrojem tažné síly a označuje se jako hnací vrtule nebo stručněji vrtule. Účinnost přeměny tohoto druhu energie určíme ze vztahu [1]:

$$\eta = \frac{Tv}{M\Omega} \quad (1)$$

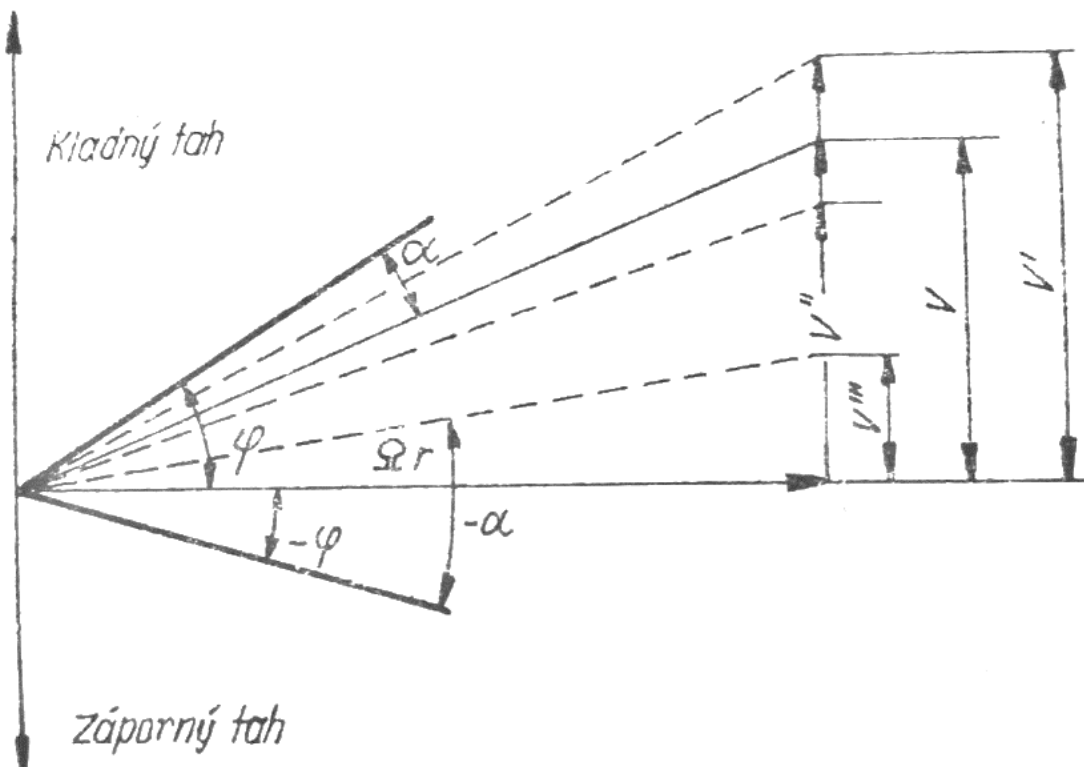
Pro druhou možnost se výkon na hřídeli motoru transformuje na výkon proudu vzduchu, vrtule je tedy zdrojem proudu vzduchu a označujeme ji jako ventilátor. Účinnost ventilátoru určíme ze vztahu [1]:

$$\eta = \frac{Qp}{M\Omega} \quad (2)$$

kde je Qp přeměněný výkon proudu vzduchu za ventilátorem, p označuje přetlak vzduchu a Q definuje průtokové množství vzduchu, jež je určeno součinem plochy ventilátorového disku S a rychlostí proudu v [1].

V poslední variantě přeměny energie je vrtule motorem, a proto ji nazýváme větrným motorem [1].

Zaměříme se nyní blíže na úhel náběhu α při změně dopředné rychlosti v . Mějme řez vrtulovým listem svírající úhel φ s rovinou rotace vrtule, ve vzdálenosti r od osy rotace, úhlovou rychlostí Ω a dopřednou rychlostí v . Považujme také úhel náběhu α , při těchto podmínkách, za blízký optimálnímu úhlu náběhu. Pokud zvětšíme dopřednou rychlost, úhel náběhu α se zmenší a zároveň se sníží odpor listu vůči rotaci a vrtule se odlehčí. Pokud zůstává výkon vrtule konstantní, roste úhlová rychlost vrtule, až opět nastane rovnováha mezi výkonem dodaným a spotřebovaným. Obrácená situace nastane při snížení dopředné rychlosti, kdy roste úhel náběhu α a při konstantním výkonu motoru otáčky vrtule klesají. Chceme-li dosáhnout konstantních otáček vrtule při změnách posuvné rychlosti, musíme udržet konstantní i úhel náběhu α , musí se tedy měnit úhel nastavení listu φ [1].



Obrázek 4 Změny rychlostního trojúhelníku řezu listu při změně vrtulového režimu [1]

Pro tento případ existují tzv. stavitelné vrtule, u nichž je možné měnit úhel nastavení za letu. Pro případ, kdy je posuvná rychlost v rovna nule platí, že úhel nastavení φ je roven úhlu náběhu α , dále platí, že úhel nastavení listu vrtule φ je nejmenší právě při nulové posuvné rychlosti [1].

1.3 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY VRTULE

Některé vlastnosti vrtule jsou určeny tzv. vrtulovými charakteristikami, ty můžeme rozdělit na tři základní druhy:

1. Geometrické charakteristiky
2. Aerodynamické charakteristiky
3. Dynamické charakteristiky

V této části se zaměříme pouze na charakteristiky geometrické, mezi které řadíme: průměr vrtule, šířku listu, tloušťku listu, úhel nastavení profilu listu, zkroucení listu a plošnou plnost [1].

1.3.1 PRŮMĚR VRTULE D

Jedná se o nejdůležitější parametr vrtule, jelikož především průměr definuje samotnou velikost vrtule. Průměr vrtule je určen jako průměr kružnice opisující konce vrtulových listů při rotaci a je volen na základě aerodynamických požadavků a dovolených vnějších rozměrů. Průměr vrtule je velmi podstatný pro konstrukci letadel, určuje totiž výšku podvozku či velikost nosné plochy, do které se podvozek zatahuje (u jednomotorových letadel) nebo uspořádání motorů (u vícemotorových letadel) [1].

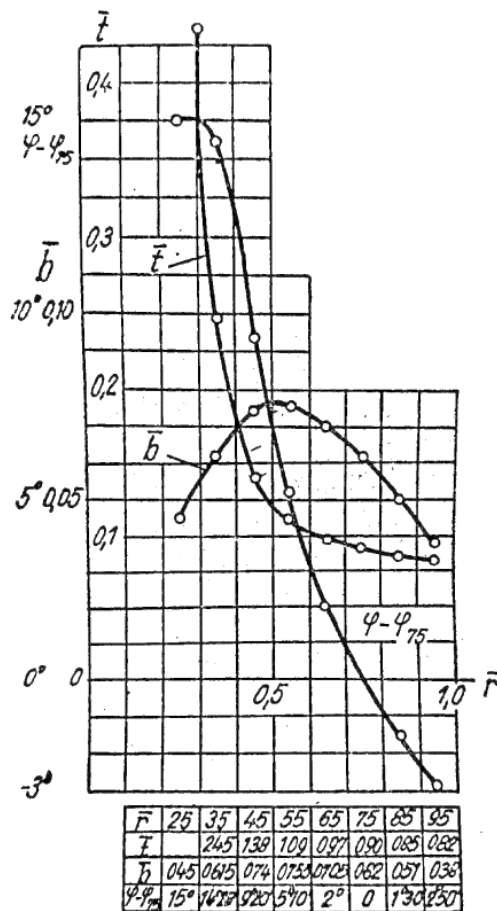
1.3.2 ŠÍŘKA LISTU B

Šířka listu se mění podél délky listu vrtule, nejvyšších hodnot nabývá většinou přibližně v polovině poloměru vrtule. Pokud se jedná o obdélníkový list, je šířka listu konstantní. Zavedíme tzv. poměrnou šířku, která nahrazuje šířku absolutní, poměrná šířka je definována jako [1]:

$$\bar{b} = \frac{b}{D} \quad (3)$$

Na Obrázku 5, najdete typický průběh šířky listu, vertikální osa je definována tzv. poměrným poloměrem, který je určen vztahem [1]:

$$\bar{r} = \frac{r}{R} \quad (4)$$



Obrázek 5 Geometrická charakteristika listu [1]

1.3.3 TLOUŠŤKA LISTU T

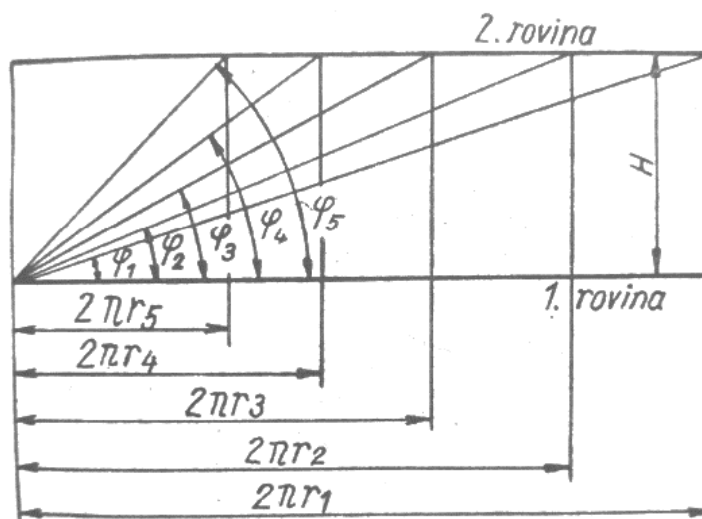
Je definována jako největší tloušťka průřezu listu (profilu) na daném poloměru. Charakteristický průběh tloušťky listu je znázorněn na Obrázku 5, tloušťka listu klesá od středu vrtule k jejímu konci. I zde zavádíme tzv. poměrnou tloušťku, která je popsána vztahem [1]:

$$\bar{t} = \frac{t}{b} \quad (5)$$

1.3.4 ÚHEL NASTAVENÍ PROFILU LISTU ϕ

Úhel mezi tětivou profilu a rovinou rotace, který se po poloměru listu mění. Existují tzv. geometrické vrtule, pro které platí, že jsou jejich listy tvořeny částí šroubové plochy a jejich úhel nastavení lze definovat pomocí analytické závislosti [1].

Mějme jeden závit šroubovice, tedy fragment šroubovice, omezený dvěma rovnoběžnými rovinami kolnými na její osu. Nyní můžeme označit tzv. stoupání šroubovice H , které je určeno vzdáleností těchto dvou rovnoběžných rovin. Navineme-li na válec o poloměru r úhlopříčku obdélníku se základnou $2\pi r$ a výškou H , získáme jeden závit šroubovice. Úhel mezi úhlopříčkou obdélníku a jeho základnou je ϕ , tedy úhel nastavení profilu listu [1].



Obrázek 6 Stoupání vrtule [1]

Dráhu, kterou vrtulový list urazí ve směru osy za jednu otáčku vrtule kolem této osy, označujeme jako geometrické stoupání. Vrtule mívají stoupání podél listu konstantní, ale i proměnné. V případě, že je geometrické stoupání podél listu konstantní, mění se úhel profilu podle vztahu [1]:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{H}{2\pi r} \quad (6)$$

Pro popis charakteristiky vrtule se zavádí tzv. úhel nastavení listu, který přísluší určitému poloměru. Tímto poloměrem byl určen poměrný poloměr $\bar{r} = 0,75$. I u geometrického stoupání zavádíme pojem tzv. poměrné stoupání, které je popsáno rovnicí [1]:

$$h = \frac{H}{D} \quad (7)$$

1.3.5 ZKROUCENÍ LISTU

Zkroucením listu rozumíme úhly mezi tětívami profilů na uvažovaných poloměrech s tětívou profilu na poloměru, který volíme jako referenční. Za tento referenční poloměr byl zvolen poměrný poloměr 0,75. Jedná se tedy o rozdíl úhlů $\varphi - \varphi_{75}$, kde φ popisuje úhel nastavení profilu listu na daném poloměru r a φ_{75} úhel nastavení listu na referenčním poloměru $\bar{r} = 0,75$. Spolu s průběhem šířky a tloušťky listu, najdete na Obrázku 5, i typický průběh zkroucení listu [1].

V některých případech se používají i další geometrické charakteristiky, mezi které patří rozvinutá plocha listu a plošná plnost [1].

Rozvinutou plochu listu můžeme vyjádřit integrálem:

$$S = \int_{r_0}^R b \, dr, \quad (8)$$

kde $b dr$ je elementární plocha listu a meze integrálu jsou od počátečního poloměru r_0 do konce vrtulového listu R . [1]

Plošnou plnost vrtule, která popisuje poměr mezi rozvinutou plochou vrtulových listů a plochou mezikruží, definujeme vztahem:

$$L = \frac{S z}{\pi (R^2 - r_0^2)}, \quad (9)$$

kde z vyjadřuje počet listů vrtule [1].

Mezi další důležité charakteristiky vrtule patří i její kinematické vlastnosti, mezi které řadíme aerodynamické stoupání a skluz. Vrtule rotuje kolem vlastní osy rotace úhlovou rychlostí Ω , kterou můžeme vyjádřit vztahem:

$$\Omega = 2\pi n_s, \quad (10)$$

kde n_s vyjadřuje počet otáček za vteřinu, pokud má vrtule i posuvnou rychlost v , posune se o dráhu $\frac{v}{n_s}$ za jednu otáčku. Tuto hodnotu označujeme jako aerodynamické stoupání vrtule. Pokud podělíme aerodynamické stoupání vrtule průměrem, dostaneme rychlostní poměr:

$$J = \frac{v}{n_s D}, \quad (11)$$

který má významný vliv při výběru a výpočtu vrtule [1].

Jak již bylo zmíněno výše, geometrické stoupání vrtule je dráha, kterou vrtule urazí ve směru osy rotace za jednu otáčku. Nyní si definujeme tzv. skluz vrtule, který je vyjádřen rozdílem geometrického a aerodynamického stoupání, tedy:

$$s = H - \frac{v}{n_s}, \quad (12)$$

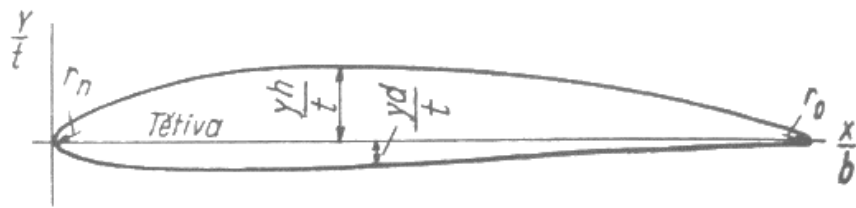
poměrný skluz má následně tvar [1]:

$$\bar{s} = h - J \quad (13)$$

1.4 VRTULOVÉ PROFILY

Tvar profilu je definován souřadnicemi jeho obrysu, které jsou vztaženy k souřadnicovému systému. Jedna osa tvoří tětivu profilu, druhá osa je na ní kolmá a dotýká se náběžné hrany daného profilu. Tětiva profilu dělí na dvě sekce, horní a dolní. Souřadnice y_h definují horní část profilu, souřadnice y_d popisují dolní část profilu. Pro snazší popis profilu se souřadnice často udávají v poměrných hodnotách, tedy [1]:

$$\bar{x} = \frac{x}{b} 100\% \quad (14)$$



$$\bar{t} = (\bar{y}_h + \bar{y}_d)_{max}$$

$\frac{x}{b}$ %	0	2,5	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	100
$\frac{y_h}{t}$ %	0	18,9	30,4	46,2	65,2	72,6	73,7	70,6	63,3	52,8	40,0	24,2	15,4	0
$\frac{y_d}{t}$ %	0	-12,1	-16,7	-21,9	-25,9	-25,9	-23,5	-20,8	-18,1	-15,4	-12,7	-10,0	-8,6	0

$$r_n = 0,08 t \quad x_o = 0,448 b \quad I_{max} = 0,0410 b^3 t$$

$$r_o = 0,08 t \quad y_o = 0,195 t \quad I_{min} = 0,0423 b t^3$$

$$F = 0,705 b t$$

Obrázek 7 Typický profil vrtulového listu [1]

Pro souřadnice platí:

$$\bar{y}_h = \frac{y_h}{t}, \quad (15)$$

$$\bar{y}_b = \frac{y_b}{t} \quad (16)$$

Důležitými parametry profilu jsou především souřadnice těžiště profilu, plocha profilu a hlavní momenty setrvačnosti profilu k hlavním osám setrvačnosti [1].

Poloha těžiště:

$$x_t = k_1 b, \quad (17)$$

$$y_t = k_2 t, \quad (18)$$

kde k_1 a k_2 jsou součinitelé těžiště pro daný profil [1].

Plocha profilu:

$$F = k_3 b t, \quad (19)$$

kde k_3 je součinitel plochy pro daný profil [1].

Momenty setrvačnosti:

$$I_{max} = a_1 b^3 t, \quad (20)$$

$$I_{max} = a_2 b^3 t, \quad (21)$$

kde a_1 a a_2 jsou součinitele momentu setrvačnosti pro daný profil [1].

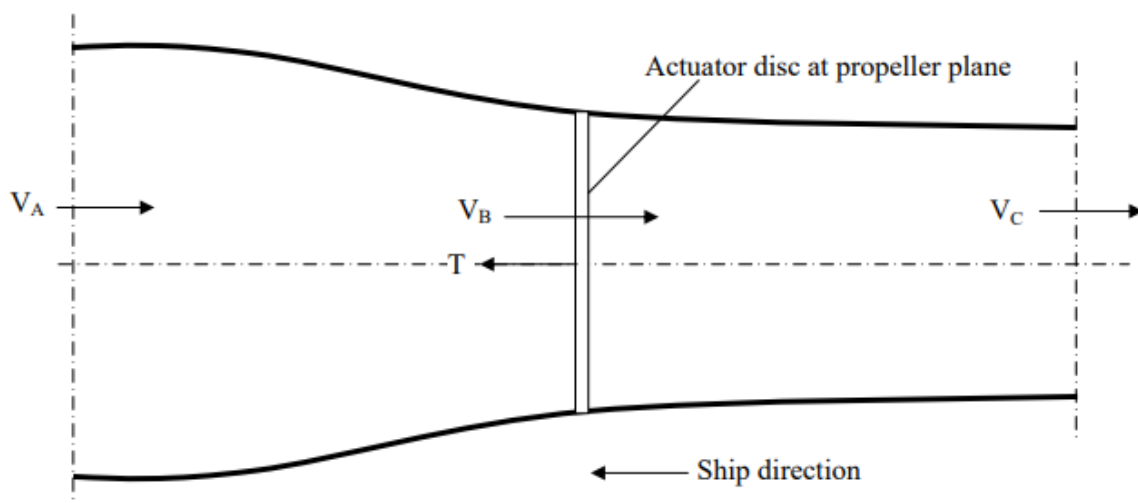
2 AERODYNAMIKA VRTULE

Vrtule jsou navrhovány několika různými metodami, jejichž cílem je dosáhnout především maximální efektivity vrtule. Některé z těchto metod jsou podrobněji popsány v této kapitole, jedná se o hybnostní teorie a teorie elementu listu.

2.1 HYBNOSTNÍ TEORIE

Tato metoda byla původně navržena pro analýzu lodních šroubů (Rankine 1865 a Froude 1885). Hybnostní teorie předpokládá, že:

- proud je neviskózní a stabilní (ideální proud), proto nedochází ke ztrátám energie způsobené třením
- vrtule je považován za disk, s nekonečným počtem listů, které mají nekonečnou štíhlost
- vrtule generuje tah bez způsobení rotace proudu za vrtulovým diskem [2]



Obrázek 8 Propulsní systém [2]

Ze základní rovnice tahu víme, že velikost tahu závisí na hmotnostním průtoku vrtulovým diskem a změně rychlosti podél propulsního systému, který je znázorněn na Obr.1. Proud postupuje zleva doprava. Indexy A a C označují oblasti proudu daleko před a za vrtulovým listem, index B oblast proudu v oblasti vrtule. Rovnice tahu je dána součinem hmotnostního průtoku a rozdílem rychlostí před a za vrtulovým diskem [2].

$$T = \dot{m}(V_C - V_A) \quad (22)$$

Tlaky v oblasti A a C jsou totožné, energie absorbovaná vrtulí je rovna [2]:

$$P_D = \frac{1}{2} \dot{m}(V_C^2 - V_A^2) \quad (23)$$

Dodaná energie vrtuli je rovna součinu tahu a rychlosti proudu v oblasti vrtule [2]:

$$P_D = TV_B \quad (24)$$

Rychlost proudu v oblasti vrtule V_B dopočítáme ze vztahu [2]:

$$V_B = \frac{1}{2}(V_C + V_A) \quad (25)$$

Pokud vyjádříme rychlosti V_B a V_C pomocí rychlosti V_A , pak:

$$V_B = V_A + u_a, \quad (26)$$

$$V_C = V_A + u_{a1}, \quad (27)$$

kde u_a a u_{a1} jsou přírůstky rychlosti v oblasti B a C propulsního systému [2].

Z rovnice kontinuity víme, že si objemové průtoky v jednotlivých oblastech musí být rovny, tedy:

$$Q_A = Q_B = Q_C \quad (28)$$

$$\rho V_A A_A = \rho V_B A_B = \rho V_C A_C \quad (29)$$

$$V_A A_A = (V_A + u_a) A_B = (V_A + u_{a1}) A_C \quad (30)$$

kde A_A , A_B a A_C jsou plochy v jednotlivých částech propulsního systému [2].

$$D_A^2 = \frac{V_A + u_a}{V_A} D^2 \quad (31)$$

$$D_C^2 = \frac{V_A + u_a}{V_A + u_{a1}} D^2 \quad (32)$$

Za použití rovnice průměru, můžeme napsat první verzi rovnici tahu jako [2]:

$$T = \frac{\pi}{4} D^2 \rho (V_A + u_a) u_{a1} \quad (33)$$

Tah můžeme také dopočítat ze vztahu [2]:

$$T = \Delta p A \quad (34)$$

Za pomoci Bernoulliho rovnice, můžeme popsat proud před a za vrtulí, ne však proud procházející skrz vrtulový disk [2].

Před vrtulí:

$$\frac{1}{2}\rho V_A^2 + p_A = \frac{1}{2}\rho(V_A + u_a)^2 + p_B, \quad (35)$$

za vrtulí:

$$\frac{1}{2}\rho(V_A + u_{a1})^2 + p_C = \frac{1}{2}\rho(V_A + u_a)^2 + p_B + \Delta p, \quad (36)$$

zároveň platí rovnost tlaků:

$$p_A = p_C \quad (37)$$

Po úpravě dvou předchozích rovnic dostaneme rovnici rozdílu tlaku:

$$\Delta p = \frac{1}{2}\rho(2V_A u_{a1} + u_{a1}^2) \quad (38)$$

Druhá verze rovnice tahu vypadá takto:

$$T = \frac{\pi}{4}D^2\rho(V_A + \frac{u_{a1}}{2})u_{a1} \quad (39)$$

Kombinací obou verzí rovnic tahu můžeme odvodit, že:

$$u_{a1} = 2u_a \quad (40)$$

Tento vztah ukazuje, že první polovina celkového zrychlení je proudů udělena před vrtulovým diskem, zbývající druhá polovina zrychlení proudů nastává za vrtulovým listem. Jinými slovy axiální indukovaná rychlost vrtule u_a je polovina celkové axiální indukované rychlosti v oblasti C [2].

Vztah mezi tahem vrtule a axiální indukovanou rychlostí je [2]:

$$T = \frac{\pi}{4}D^2\rho(V_A + u_a)2u_a \quad (41)$$

Zavedme nyní koeficient tahu c_T , jedná se o bezrozměrnou veličinu, která vyjadřuje zatížení vrtule [2]:

$$c_T = \frac{T}{\frac{\pi}{4}D^2 \frac{1}{2}\rho V_A^2} \quad (42)$$

Indukovaná rychlost proudů za vrtulí reprezentuje energii dodanou proudů vzduchu, tedy ztrátu energie. Tato ztráta se promítá do celkové efektivity vrtule, která je nižší než 1 [2].

Efektivita vrtule je popsána následující rovnicí [2]:

$$\eta_0 = \frac{TV_A}{TV_A + E_{lost}}, \quad (43)$$

Kde E_{lost} vyjadřuje ztrátu energie a můžeme ji popsat rovnicí [2]:

$$E_{lost} = \rho(V_A + u_a)\left(\frac{\pi}{4}D^2\right)(2u_a)^2 \quad (44)$$

Následující vztah popisuje maximální teoretickou účinnost vrtule, která může být dosažena v neviskózním prostředí, bez způsobení rotace proudu za vrtulovým diskem [2]:

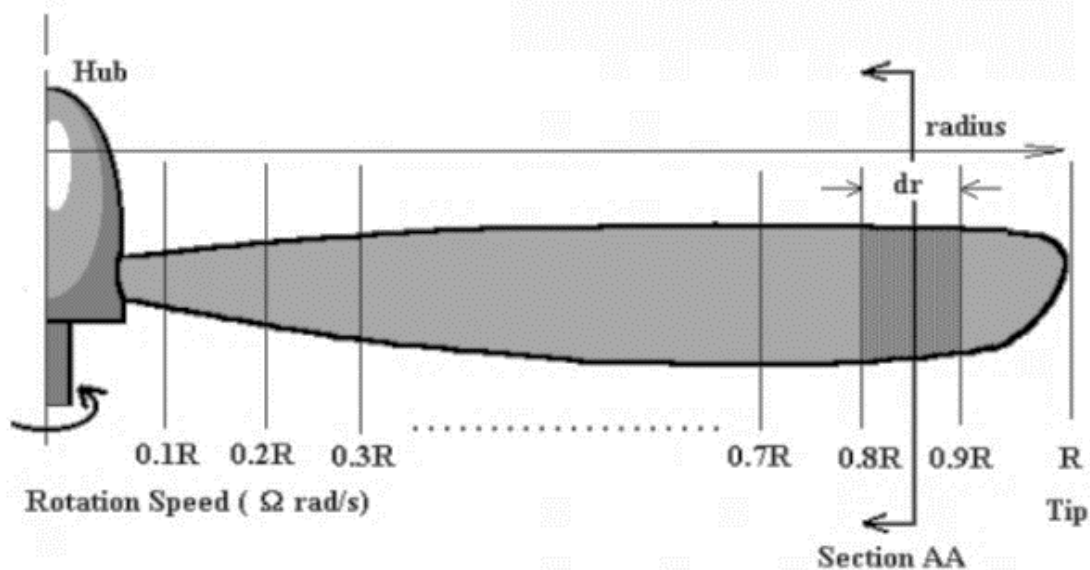
$$\eta_i = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + C_T}} \quad (45)$$

2.2 TEORIE ELEMENTU LISTU

Jedná se o relativně jednoduchou metodu, která slouží k predikci výkonu vrtule. Principem této metody je rozdělení listu vrtule na několik nezávislých částí a pro každou část listu je aplikována silová rovnováha, mezi složkami vztlaku a odporu se složkami tahu a kroučícího momentu. Současně je dodržena rovnováha axiálního a uhlového momentu hybnosti. Vzniká sada několika nelineárních rovnic, které jsou řešeny pomocí iterace každé části listu. Výsledné hodnoty jednotlivých částí listů jsou následně sečteny a z výsledků je určen odhadovaný výkon vrtule [3].

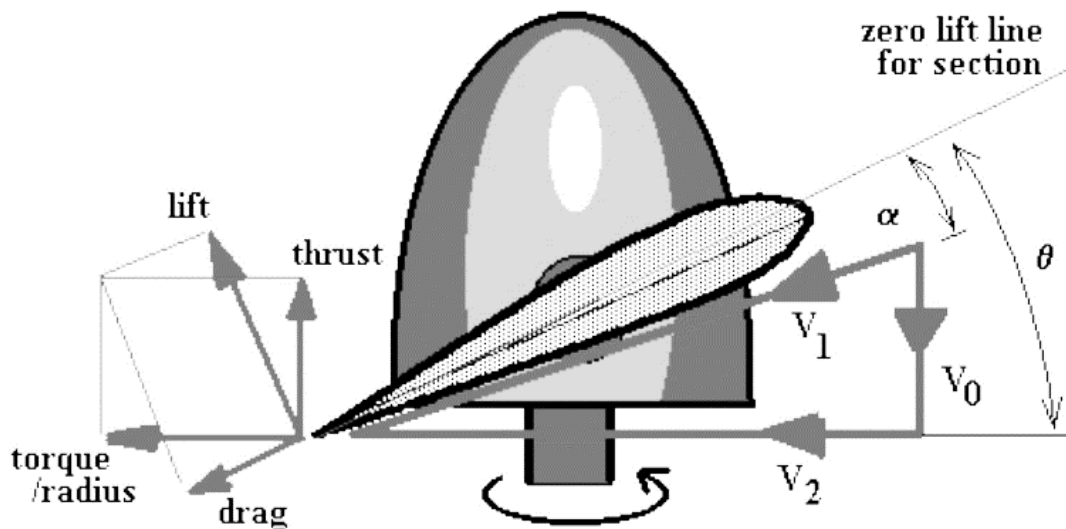
Teorie nezahrnuje vedlejší efekty jako indukovanou rychlost způsobenou vírem na konci listu vrtule nebo radiální složky proudu způsobené uhlovým zrychlením vrtule. V porovnání s reálnými výsledky jsou predikované hodnoty tahu nižší, předpokládané hodnoty kroučícího momentu vyšší, celková efektivita je nižší o 5 až 10%. Metoda je nepřesná při extrémních podmínkách provozu, například při vysokém úhlu nastavení, kdy dochází k odtržení proudu vzduchu [3].

Teorie je velmi užitečná pro optimalizaci geometrického nastavení listu pro danou rychlost nebo pro stanovení optimální pevnosti listu. I přes různá omezení se jedná o kvalitní nástroj pro prvotní určení tahu, kroučícího momentu a efektivitu vrtule pro široké spektrum pracovních podmínek [3].



Obrázek 9 Vybraná část listu vrtule – pohled shora [3]

List vrtule může být rozdělen na několik částí (viz obr1), Pro každou část je pak proud analyzován individuálně. Jak již bylo zmíněno jedním z předpokladů je zanedbání indukované rychlosti způsobené ostatními částmi listu. Každá část listu je tedy ovlivněna axiální a úhlovou rychlostí. Na obr 2 jsou znázorněny složky aerodynamických sil, které na danou část působí [3].



Obrázek 10 Silová analýza vybrané části listu vrtule [3]

Jelikož je část vrtulového listu nastavena na určitý úhel nastavení, lokální vektor rychlosti určuje úhel náběhu proudu na daném úseku. Vztlak a odpor proto můžeme dopočítat ze základních vlastností daného profilu. Převedením složek vztlaku a odporu do osy ležící v rovině

vertulového disku a osy kolmé k této rovině, dostaneme hodnoty tahu a kroutícího momentu této části listu [3].

Rozdíl úhlu mezi tahem a vztlakem je definován následovně [3]:

$$\varphi = \theta - \alpha \quad (46)$$

Složka tahu a kroutícího momentu je určena vztahem [3]:

$$\Delta T = \Delta L \cos(\varphi) - \Delta D \sin(\varphi) \quad (47)$$

$$\frac{\Delta Q}{r} = \Delta D \cos(\varphi) + \Delta L \sin(\varphi) \quad (48)$$

Výpočet vztlaku a odporu provedeme za pomoci součinitelů vztlaku a odporu pro daný úhel náběhu:

$$\Delta L = \frac{1}{2} c_L \rho v_1^2 c dr \quad (49)$$

$$\Delta D = \frac{1}{2} c_D \rho v_1^2 c dr, \quad (50)$$

kde $c dr$ vyjadřuje plochu dané části listu [3].

Pokud je počet listů vrtule B, pak celkový tah a kroutící moment generovaný těmito částmi vrtule je [3]:

$$\Delta T = \frac{1}{2} \rho v_1^2 c (c_L \cos(\varphi) - c_D \sin(\varphi)) B dr, \quad (51)$$

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \rho v_1^2 c (c_D \cos(\varphi) + c_L \sin(\varphi)) B r dr. \quad (52)$$

Celkový tah a kroutící moment vrtule dostaneme, sečteme-li jednotlivé složky tahu a kroutícího momentu po celé délce všech listů [3]:

$$T = \Sigma \Delta T, \quad (53)$$

$$Q = \Sigma \Delta Q \quad (54)$$

Následně mohou být pro daný rychlostní poměr dopočítány i bezrozměrné koeficienty tahu a kroutícího momentu [3]:

$$C_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (55)$$

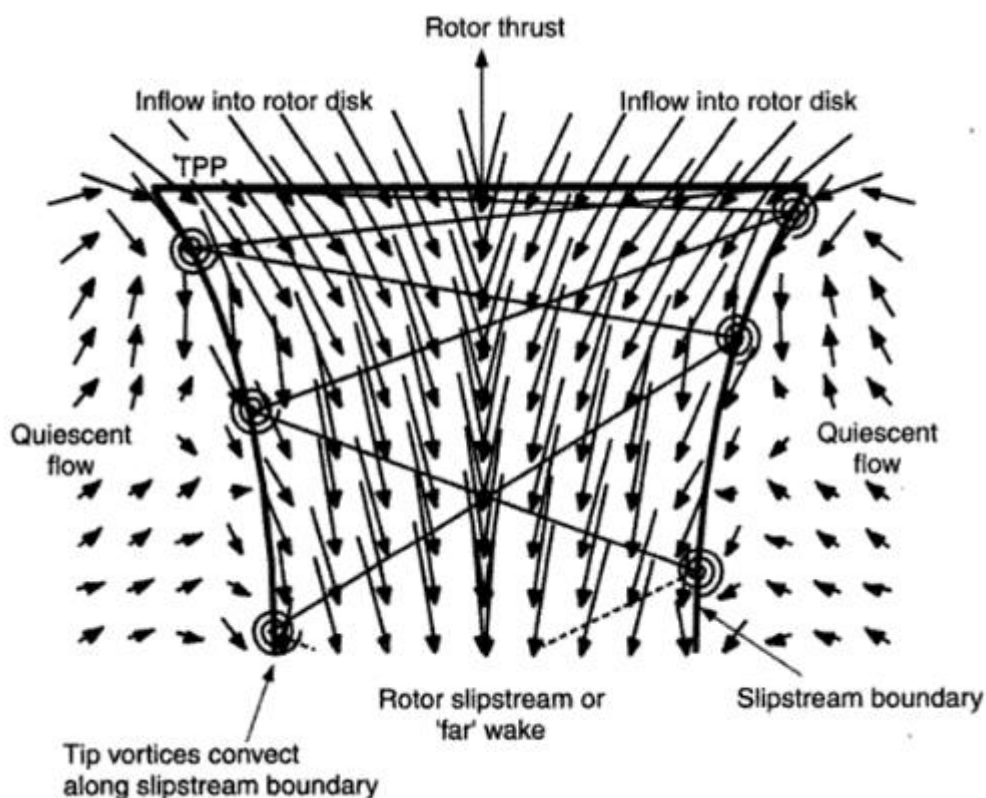
$$C_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (56)$$

Efektivita vrtule pro dané letové podmínky je určena z následujícího vztahu [3]:

$$\eta_{vrtule} = \frac{Jc_T}{2\pi c_Q} \quad (57)$$

2.3 PROUD VZDUCHU KOLEM VRTULE PŘI VISU

Vis je specifický stav letu, při kterém má vrtule nulovou dopřednou rychlost a zároveň nulovou vertikální rychlost. Proud vzduchu je proto symetrické podél osy rotace vrtule. Na Obrázku 11 je znázorněn proud vzduchu kolem vrtulového disku a jeho úplav právě při visu [4].



Obrázek 11 Rychlostní pole v blízkosti dvoulisté vrtule při visu [4]

Můžeme si povšimnout, že rychlost proudu se mírně zvýší při vstupu a průchodu vrtulovým diskem. Nejedná se o skokovou změnu rychlosti, ale jelikož vrtule generuje tah, musí zde docházet k rozdílu tlaků. Z výše zmíněného Obrázku 11 je zřejmá i existence hranice úplavu za vrtulovým diskem. Vzhledem k proudění vzduchu v této oblasti je hranice poměrně klidná. Víry vznikající na koncích rotujících vrtulových listů proudí dolů od vrtulového disku právě po této hranici. Uvnitř úplavu jsou výrazné proudy vzduchu, které mohou být rozloženy ne-

rovnoměrně. Významné je také zúžení průměru úplavu za vrtulí způsobené urychlením proudu vzduchu [4].

2.4 ZATÍŽENÍ VRTULE A VÝKONOVÉ ZATÍŽENÍ

Při analýze vrtulí je hojně užíván parametr zatížení vrtule T/A , který označujeme jako DL . Jedná se o poměr generovaného tahu vrtule při visu a obsahu vrtulového disku. Zatížení vrtule se většinou udává v kg/m^2 [4].

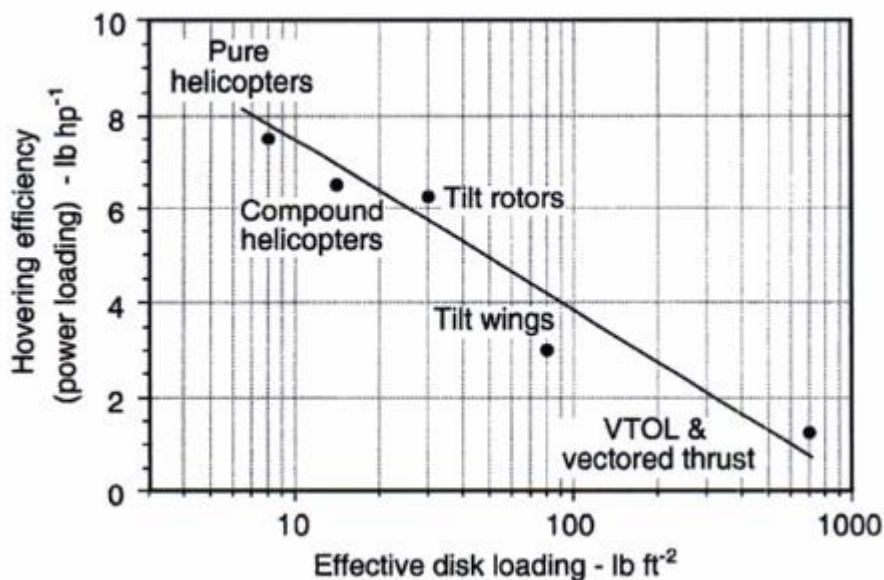
Dále se také aplikuje tzv. výkonové zatížení, zde se jedná o poměr tahu výkonu, tedy T/P a označujeme jej jako PL . Tento poměr je obvykle udáván v kg/kW . Teoretická hodnota výkonu potřebného pro vis je dána vztahem [4]:

$$P = T v_i \quad (58)$$

Z tohoto vztahu plyne, že ideální výkonové zatížení bude nepřímo úměrné rychlosti vstupujícího proudu. Platí totiž následující vztah [4]:

$$v_i = \sqrt{\frac{T}{2\rho A}} = \sqrt{\frac{DL}{2\rho}} = \frac{P}{T} = (PL)^{-1}_i \quad (59)$$

Z Obrázku 12 je zřejmé, že poměr T/P (výkonové zatížení) rychle klesá s rostoucím zatížením vrtule. Proto vrtule s nízkým zatížením potřebuje méně energie pro generovaný tah a je tak efektivnější.



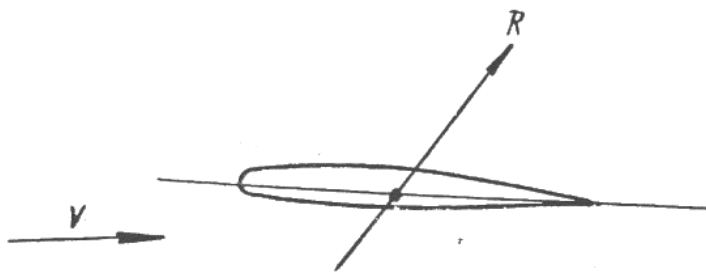
Obrázek 12 Závislost efektivity vrtule na zatížení disku vrtule [4]

Helikoptéry operují s nízkým zatížením vrtule v intervalu od $24\text{--}48 \text{ kg/m}^2$, takže mohou generovat dostatek tahu při relativně nízkém dodaném výkonu. Proto jsou helikoptéry velmi efektivní při visu ve srovnání s ostatními letouny s VTOL [4].

3 DYNAMIKA VRTULE

3.1 SÍLY A MOMENTY PŮSOBÍCÍ NA VRTULI

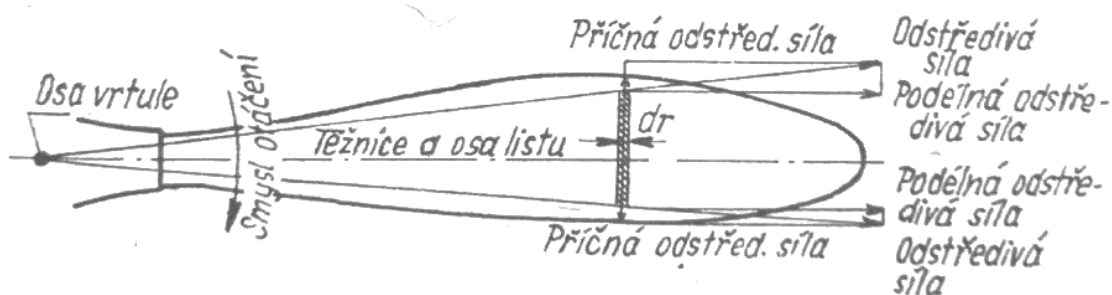
Uvažujme obecný pohyb, který je složen z rovnoměrné rotace vrtule a rovnoměrného pohybu ve směru osy rotace, v tomto případě působí na vrtuli síly aerodynamické a síly odstředivé. Působením tlaku vzduchu na list vrtule vznikají na celém povrchu listu aerodynamické síly, jejichž výslednici znázorníme na elementu listu vektorem, který leží v rovině kolmé na rovinu rotace. Působíště tohoto vektoru leží na průsečíku výslednice aerodynamické síly s těživou profilu listu. Rozložení vektorů elementárních výslednic podél listu je určeno jistým zákonem [1].



Obrázek 13 Působíště vztlaku profilu [1]

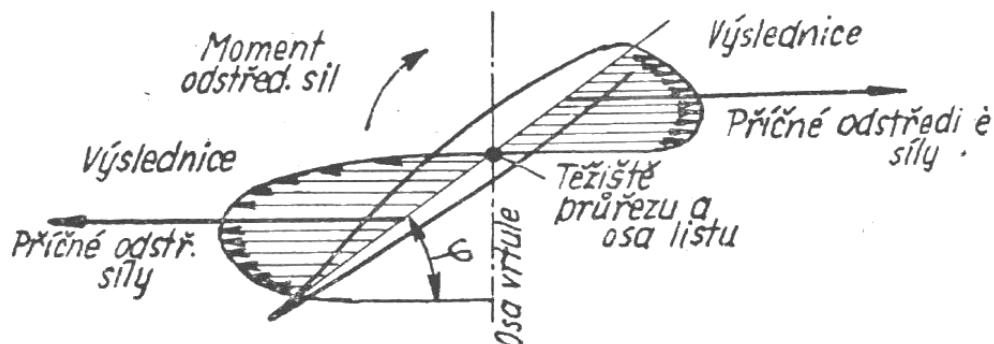
Vrtulový list, který je zatížen tímto způsobem, můžeme považovat za vetknutý nosník se spojitým zatížením. Vrtulový list je pak tímto zatížením namáhán na krut a ohyb, dochází k vychýlení listu z původní roviny rotace a k natočení listu kolem jeho osy [1].

Další zatížení je způsobeno odstředivou silou, která je kolmá na osu rotace a je orientována ze středu vrtulové kružnice. Pokud se podíváme na působení odstředivé síly na element vrtulového listu, zjistíme, že tato síla protíná osu rotace a je k ní kolmá. Pokud vektor rozložíme do roviny otáčení vrtule, na složku rovnoběžnou s osou listu a složku kolmou na tuto osu, a zároveň provedeme toto rozložení pro každý element daného řezu, zjistíme, že síly mají opačnou orientaci na různých stranách profilu, který je rozdělen osou listu [1].



Obrázek 14 Rozklad odstředivé síly elementu listu na podélnou a příčnou složku [1]

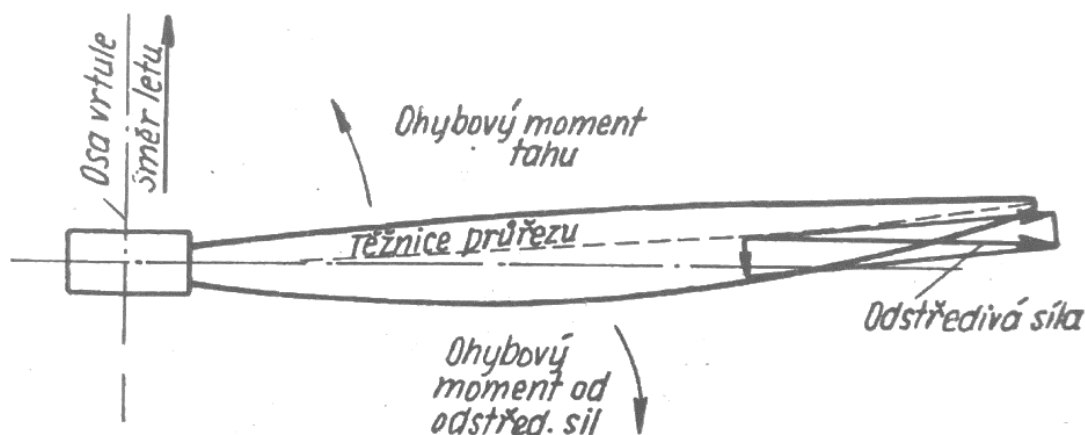
Když sečteme tyto elementární síly, dostaneme výslednice, které tvoří dvojici sil.



Obrázek 15 Průběh sil, dávajících v průřezu listu dvojici, jež se snaží pootočit list na menší úhel nastavení [1]

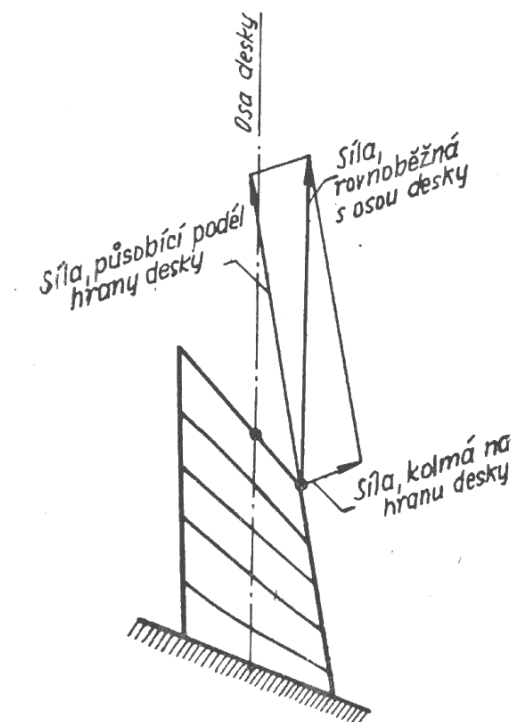
Výsledná velikost této dvojice sil se po délce listu mění a způsobuje jeho zkrucování. Moment způsobený složkami odstředivé síly tedy natáčí list na menší úhel nastavení. Tah, kterým je list namáhán, je způsoben druhými složkami odstředivé síly, jejichž výslednice je rovnoběžná s rovinou rotace [1].

Jak již bylo zmíněno výše, osa vrtulového listu je ohýbána aerodynamickými silami, nachází-li se vrtulová osa v rovině rotace, je vychýlena ohybovým momentem z této roviny. Složky tahového zatížení odstředivých sil svírají s prohnutou osou listu určitý úhel, proto je můžeme dále rozložit na složky tečné k ose listu, které namáhají list tahem a složky rovnoběžné s osou rotace, které vyvolávají ohybový moment působící proti ohybovému momentu aerodynamických sil. Je tedy zřejmé, že vrtulový list může být ohýbán i odstředivými silami [1].



Obrázek 16 Odlehčení listu od ohybového momentu tahu vrtule účinkem ohybového momentu odstředivé síly [1]

Pro lepší ilustraci můžeme nahradit vrtulový list zkrouceným pásem, který je namáhán tahem od odstředivé síly a v důsledku působení této síly rozkručován. Pás je totiž rozkručován normální složkou podélné síly, kterou získáme při rozložení této síly na tečnou a normální složku. obr 243 Obdobně je zatěžován i vrtulový list, který je působením normální složky odstředivé síly rozkručován, úhel nastavení se tedy zvyšuje [1].



Obrázek 17 Zmenšení kroucení zkroucené desky působením síly rovnoběžné s osou zkroucení [1]

Vrtulový list je tedy odstředivými silami kroucen dvěma způsoby. První kroučící moment nastává působením dvojice složek odstředivé síly, kdy se snižuje úhel nastavení. Druhý kroučící moment je způsoben podélnou silou a úhel nastavení se zvětšuje. Mezi těmito kroučícími momenty existuje významný rozdíl. Zatímco první kroučící moment je momentem listu a zohledňujeme jej při výpočtu a konstrukci vrtulového středu, druhý kroučící moment je momentem vnitřním a zohledňujeme jej pouze při pevnostních výpočtech listu. Obecně můžeme konstatovat, že vrtulový list je ohýbán a kroucen aerodynamickými silami a síly odstředivé jej namáhají tahem, krutem a ohybem [1].

Jelikož je zkrut listů vrtule a napětí způsobené kroučícím momentem malé, zanedbáváme je. Pevnostní výpočet vrtule se tak zjednoduší na určení tahového napětí od odstředivých sil a ohybového napětí do sil aerodynamických. Pro celkové napětí dostáváme výraz [1]:

$$\sigma = \sigma_{\omega} + \sigma_a, \quad (60)$$

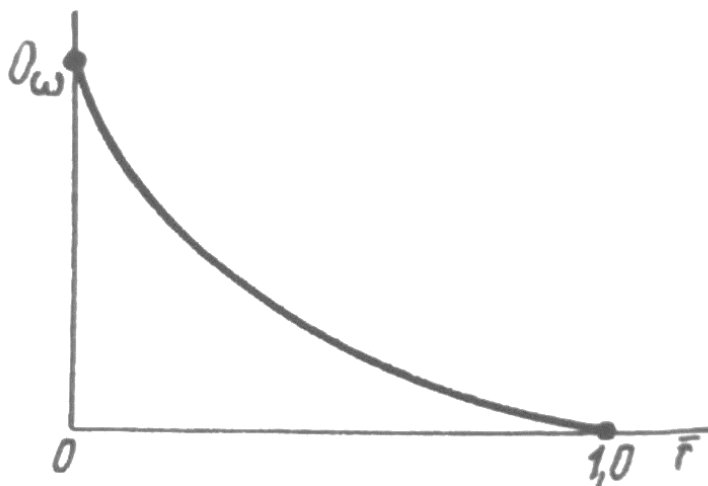
kde σ_{ω} vyjadřuje tahové napětí způsobené odstředivými silami a σ_a tahové napětí způsobené ohybem listu vrtule aerodynamickými silami [1].

Odstředivou sílu elementu listu získáme ze vztahu [1]:

$$F_{odstř.} = m \cdot \omega^2 r, \quad (61)$$

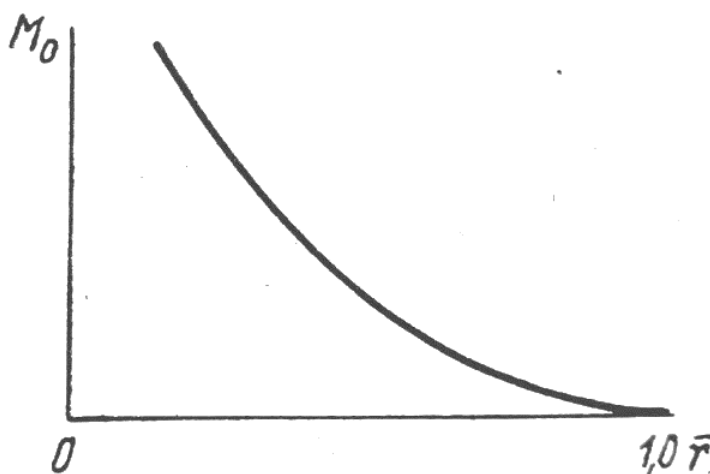
kde m je hmotnost elementu, r vzdálenost elementu od osy rotace a Ω úhlová rychlost [1].

Pokud chceme získat odstředivou sílu působící v daném řezu listu, musíme sečíst veškeré odstředivé síly elementů od daného řezu až po vnější konce listu. Je zřejmé, že odstředivá síla roste s postupným přibližováním se k ose rotace [1].



Obrázek 18 Průběh velikosti odstředivé síly podél listu [1]

Velmi podobný průběh má i ohybový moment od aerodynamických sil.



Obrázek 19 Průběh ohybového momentu podél listu [1]

3.2 HLUK VRTULE

Hluk vrtule je jedním z důležitých parametrů vrtule a má hned několik příčin. Zaměříme se nyní na jednotlivé složky hluku. Hlavním důvodem vzniku hluku je periodicky se měnící tlak a víry vznikající při rotaci vrtule. Každý list vrtule způsobuje při otáčení vzruchy vzduchu, počet vzruchů je určen součinem otáček a počtem listů, tedy $n \cdot z$. Dále můžeme tento hluk vrtule rozdělit na hluk způsobený tahem vrtule a hluk jehož původem je tloušťka listu. Hluk generovaný tloušťkou listu vzniká obtékáním listu vzduchem a následným vznikem periodických rozruchů, které se projeví zvukem rotace. Druhá složka hluku, tedy hluk generovaný tahem vrtule, je způsoben tlakovým rozdílem horní a dolní části profilu listu. Dalším důvodem vzniku hluku jsou víry, které se odtrhávají od povrchu listu. Jelikož se po délce listu mění rychlost nabíhajícího proudu vzduchu, mění se i výška zvuku, která roste se vzdáleností od osy rotace. Někdy může být hluk generován i vibracemi listu, které jsou však nežádoucí a u funkčních vrtulí se objevují minimálně [1].

3.2.1 SNÍŽENÍ HLUKU VRTULE

Jelikož má hluk negativní vliv na člověka, snižuje jeho pozornost a urychluje příchod únavy, je snahou konstruktéra zmenšit hluk generovaný vrtulí na minimum. Jedním ze způsobů je použití tenkých listů, protože jak již bylo zmíněno výše, jedna složka hluku je způsobena právě tloušťkou listu a platí, že s menší tloušťkou listu klesá hluk. Dalším způsobem redukce hluku, způsobeného tloušťkou listu, je snížení rychlosti na konci listu, opět platí, že s klesající rychlostí, klesá i hodnota hluku. Hluk generovaný tahem vrtule je ovlivněn tahovým zatížením listu, pokud toto zatížení snížíme, snížíme i hladinu hluku. Tahové zatížení listu může být redukováno dvěma způsoby, první z nich je zvětšení šířky listu, druhý pak zvětšením počtu listů vrtule [1].

4 VYVAŽOVÁNÍ VRTULE

Tato kapitola pojednává o vyvažování vrtulí, jejich možnostech a způsobech. Nevyvážená vrtule je totiž velice nežádoucí a nebezpečná, jelikož snižuje efektivitu vrtule, ale především způsobuje vibrace, které mohou mít až katastrofické následky. Existuje několik důvodů, proč může být vrtule nevyvážená [1]:

1. Geometrická nerovnováha vrtule
2. Hmotnostní nerovnováha vrtule
3. Mechanická nerovnováha vrtule

Aby byla vrtule geometricky symetrická, musí mít průřezy všech jejích listů na libovolném poloměru stejnou polohu v prostoru vůči rovině kolmé na osu vrtule. V případě, že jsou listy v geometrické nerovnováze, generují různé aerodynamické síly, které způsobují nevyváženost [1].

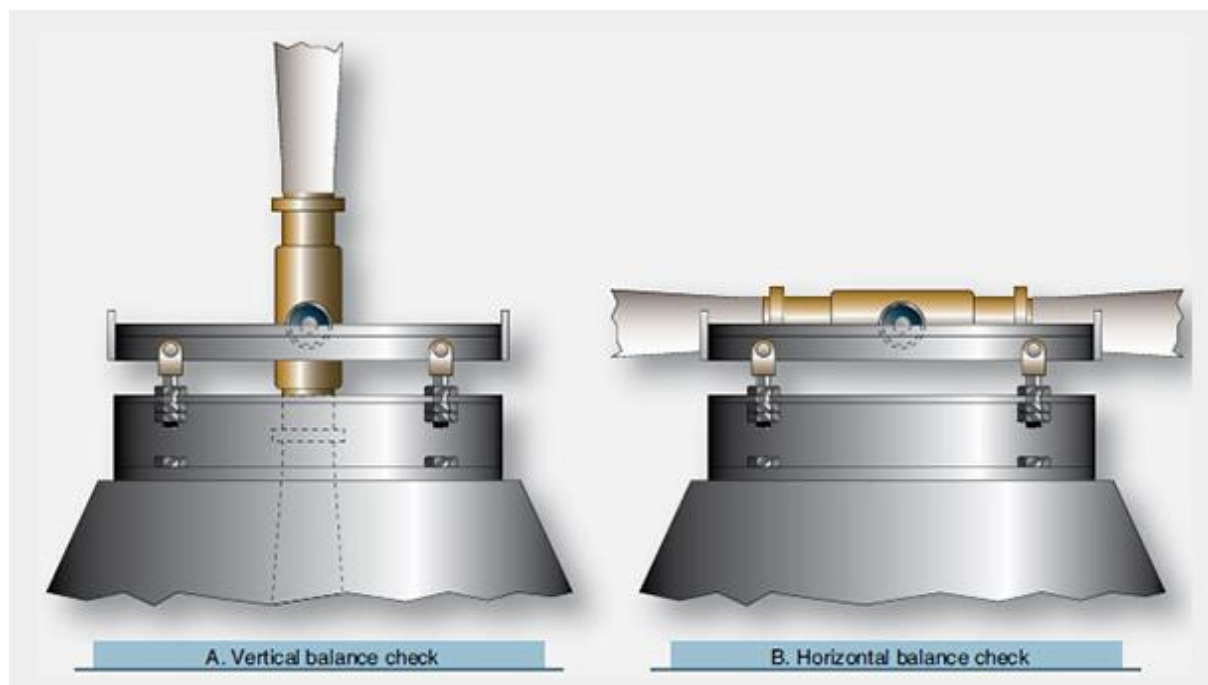
Hmotnostní rovnováha musí být zajištěna k ose vrtule, tedy hmotnostní momenty jednotlivých řezů, které jsou dány součinem vzdálenosti a hmotnosti daného řezu, musí být totožné. Pokud je tato podmínka splněna, hovoříme o staticky vyvážené vrtuli. V případě dynamického vyvážení musíme zajistit i vyvážení listů vrtule v rovině kolmé na osu vrtule, procházející jejím těžištěm. Aby byla vrtule dynamicky vyvážená, musí těžiště každé poloviny vrtule, vzniklé rozříznutím zmíněnou rovinou, ležet na ose vrtule [1].

Mechanickou nerovnováhou rozumíme stav poruchy geometrické symetrie vlivem působení sil na otáčející se vrtuli. Mezi tyto zatěžující síly patří ohybová, tahová a zkrutová síla. Působením těchto sil může dojít i k hmotnostní nesymetrii [1].

Mezi jednotlivými nerovnováhami existují vzájemné vztahy, takže jedna nerovnováha může způsobit jinou a obráceně [1].

4.1 STATICKÉ VYVAŽOVÁNÍ

Dvě ostré hrany jsou pevně uchyceny ke stojanu tak, aby umožnily volnou rotaci vrtule mezi nimi. Tyto hrany musí být v maximální rovnováze a stojan by měl být umístěn v místě bez jakéhokoliv proudění vzduchu a vibrací [5].



Obrázek 20 Vyvažování vrtule ve vertikální a horizontální poloze [6]

Vyváženost vrtule je následovně testována ve dvou pozicích, svislé a vertikální. Pokud je vrtule staticky vyvážená, měla by setrvat v rovnováze v libovolné pozici. Pokud má vrtule tendenci rotovat v jakémkoliv směru, znamená to, že není dokonale vyvážena a musí být provedena korekce. Podle materiálu vrtule můžeme materiál přidat nebo odebrat tak, abychom dosáhli rovnovážného stavu ve všech pozicích [5].

4.2 DYNAMICKÉ VYVAŽOVÁNÍ

Vrtule mohou být také vyvažovány dynamicky, k tomuto účelu slouží zařízení, většinou akcelerometr, který měří vibrace, především při otáčkách cestovní rychlosti, a následně pomocí softwaru a naměřených hodnot, určí správnou polohu a hmotnost přidávaného vyvažovacího materiálu. Zmíněný postup se několikrát opakuje až je dosaženo požadovaného výsledku [5].

5 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU

Pro návrh vlastní sklopné vrtule je vhodné znát parametry konkurenčních sklopných vrtulí s podobným průměrem (cca 390 mm). Proto bylo zakoupeno šest různých karbonových vrtulí, které byly následně podrobně analyzovány. Jedná se o sklopné vrtule od předních světových výrobců vrtulí, ale i poměrně levné vrtule především z čínského trhu. Tyto vrtule byly pro snazší identifikaci označeny písmeny A – F.

Následující kapitola popisuje provedené analýzy a jejich výsledky. Na Obrázku 20. a 21. jsou zobrazeny testované vrtule z pohledu zepředu a z pohledu shora.



Obrázek 21 Testované vrtule – pohled zepředu



Obrázek 22 Testované vrtule – pohled shora

5.1 ROZMĚROVÉ A HMOTNOSTÍ CHARAKTERISTIKY

Prvním a velice důležitým parametrem je samotný průměr vrtule, tedy průměr kružnice opsané konci listů.

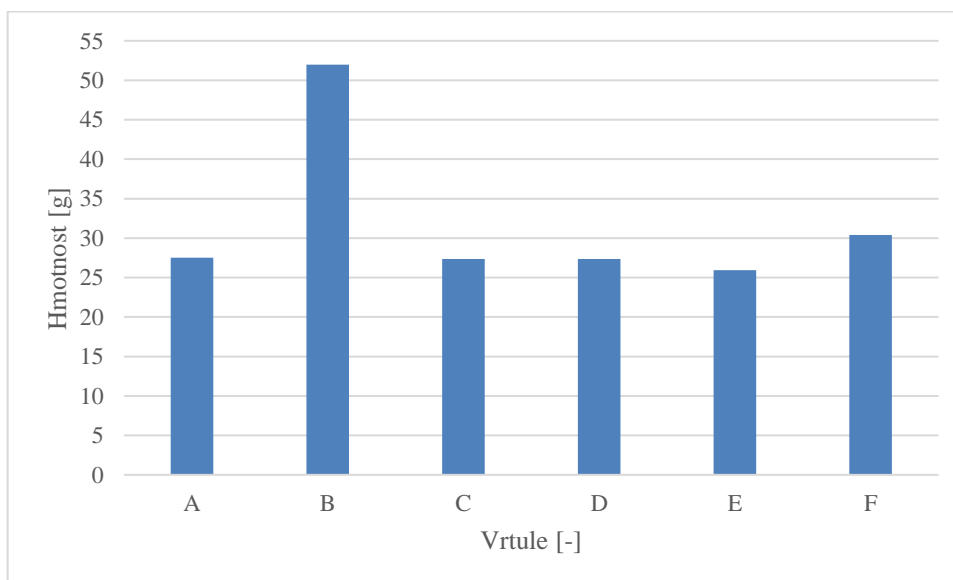
vtule	A	B	C	D	E	F
průměr [mm]	395	393	386	395	382	382

Tabulka 1 Průměr vrtule

Druhým měřeným parametrem je hmotnost vrtule. Jelikož je sklopná vrtule tvořena dvěma listy a centrálním unašečem, byly jednotlivé komponenty váženy jednotlivě. V tabulce 2 jsou zaznamenány naměřené hodnoty. Z Grafu 1 je zřejmé, že hmotnost většiny vrtulí je velice podobná a pohybuje se v intervalu od 25-30,5g. Pouze vrtule B byla výrazně těžší a to téměř dvojnásobně, její hmotnost činila 52g.

vtule	A	B	C	D	E	F
list 1 [g]	8,9	15,4	8,2	8,75	8,2	10,3
list 2 [g]	8,9	15,4	8,2	8,9	8,15	10,4
unašeč [g]	9,7	21,2	10,95	9,7	9,6	9,7
celkem [g]	27,5	52	27,35	27,35	25,95	30,4

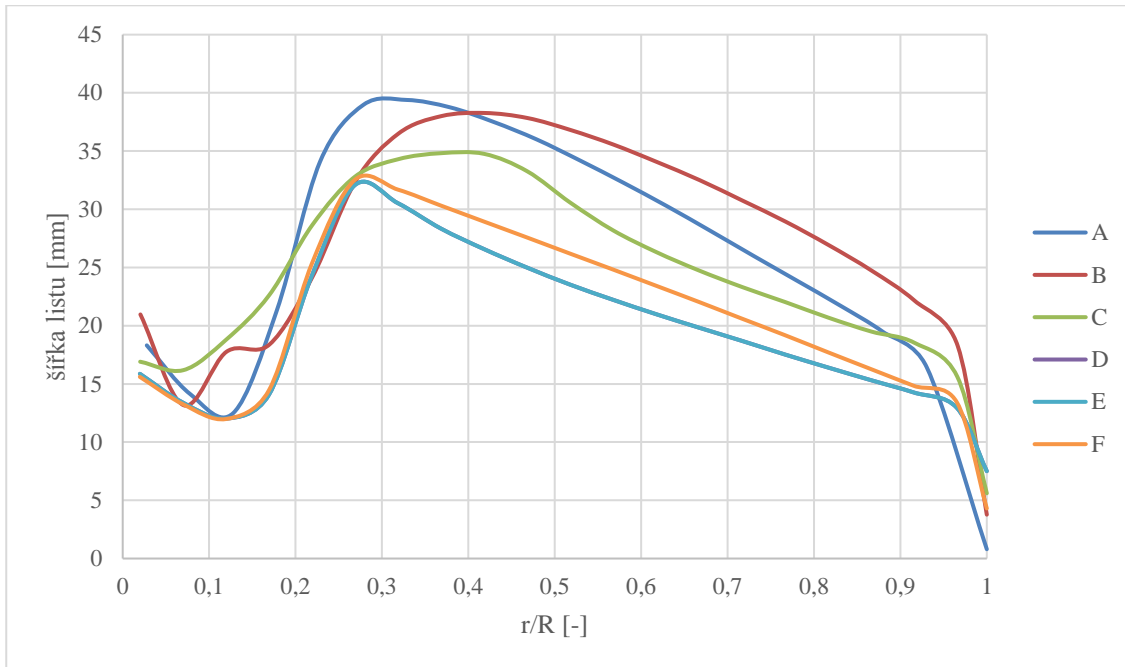
Tabulka 2 Hmotnosti jednotlivých komponentů vrtule



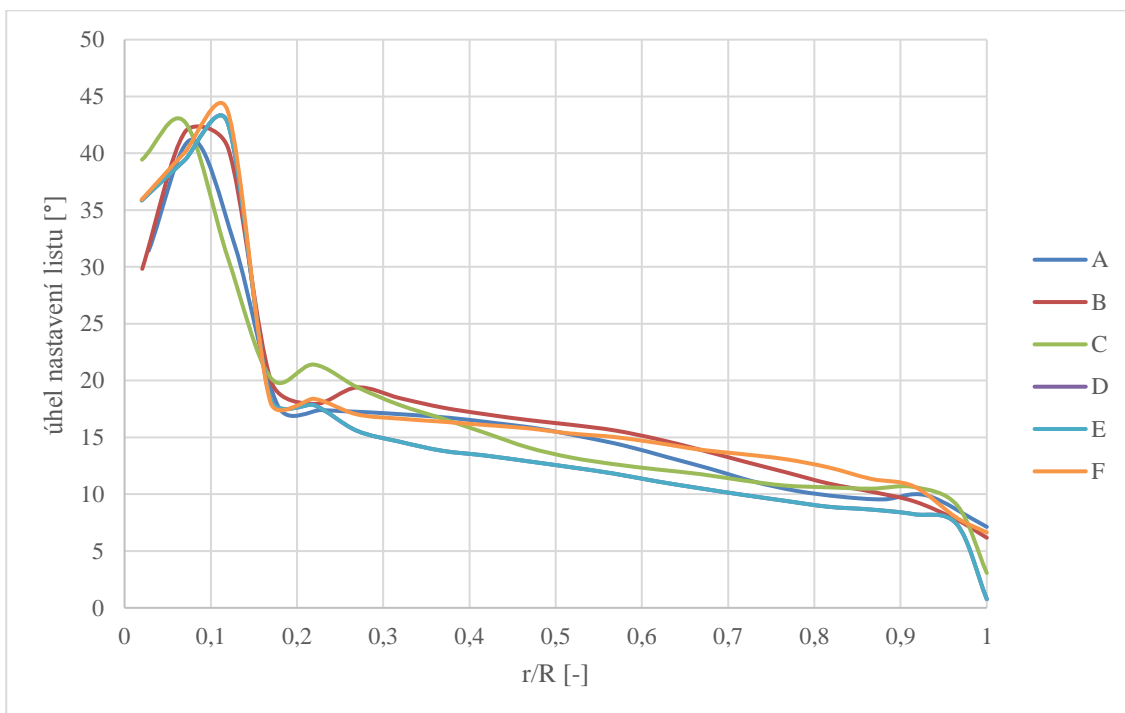
Graf 1 Celková hmotnost vrtule

5.2 GEOMETRIE LISTU

Za pomoci softwaru Propeller Scanner [7] byla zanalyzována i geometrie jednotlivých listů vrtulí, respektive šířka listu a jeho úhel nastavení. Z pořízených scanů z čelního a horního pohledu software vytvoří tabulku rozměrů v jednotlivých řezech.



Graf 2 Rozložení šířky listu



Graf 3 Úhel nastavení listu

5.3 VÝKONOVÉ CHARAKTERISTIKY

Po hmotnostním a geometrickém rozboru byla provedena výkonová analýza vrtulí. Testování bylo prováděno na měřícím standu RC Benchmark 1585 Series.



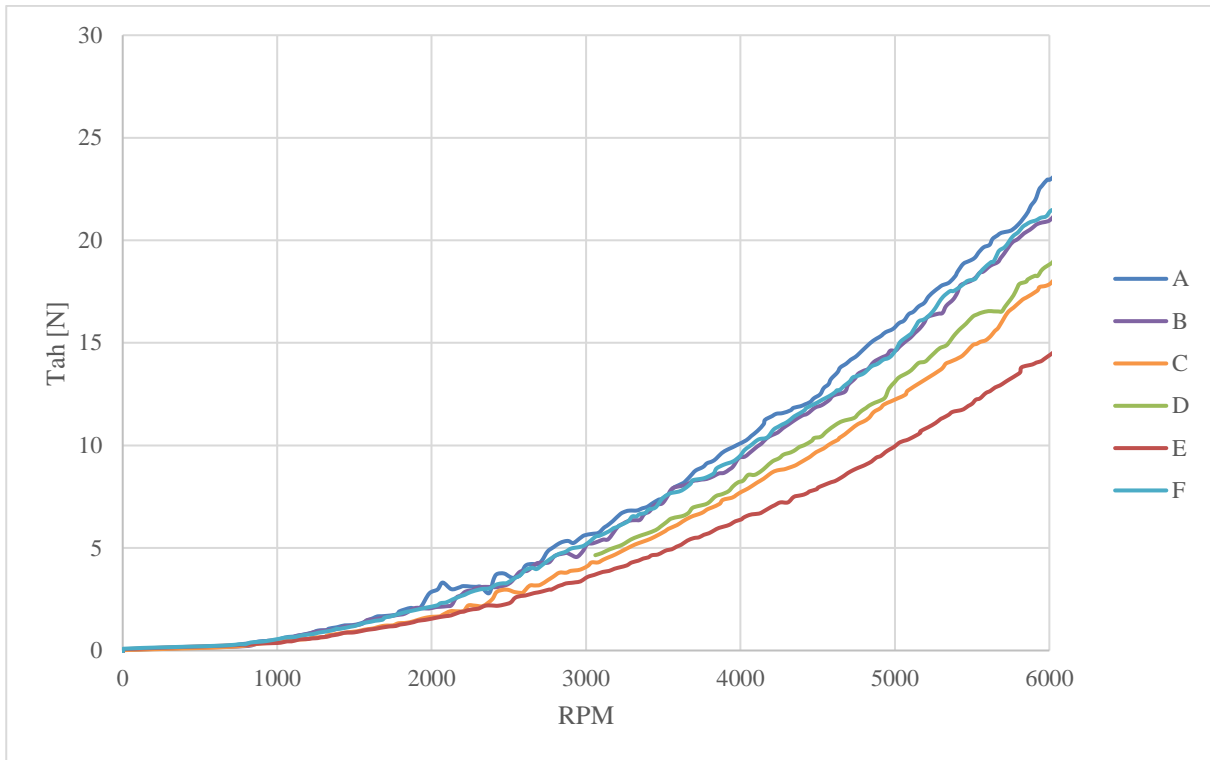
Obrázek 23 Měřící stand RC Benchmark 1585 Series [8]

Tento měřící stand zaznamenává tah vrtule, krouticí moment, otáčky motoru, elektrický proud, ekletické napětí a vibrace.

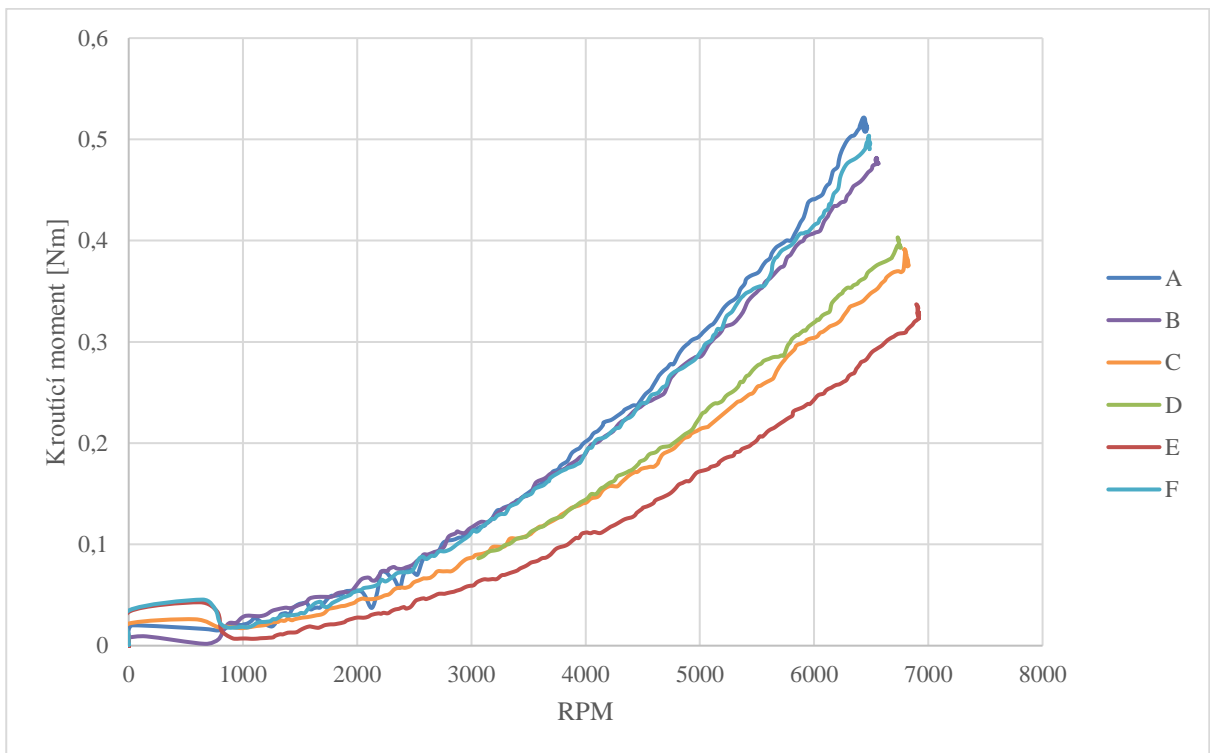
Veličina	Min.	Max.	Tolerance	Jednotky
Tah	-5	5	0,5 %	Kg
Krouticí moment	-1,5	1,5	0,5 %	Nm
Napětí	0	35	0,5 %	V
Proud	0	40	1,0 %	A
Otáčky	0	20 000	1	RPM
Vibrace	0	8	-	g

Tabulka 3 Specifikace měřícího standu RC Benchmark 1585 Series [9]

Frekvence zaznamenávání hodnot se pohybuje od 8 do 50 Hz, dle nastavení softwaru.

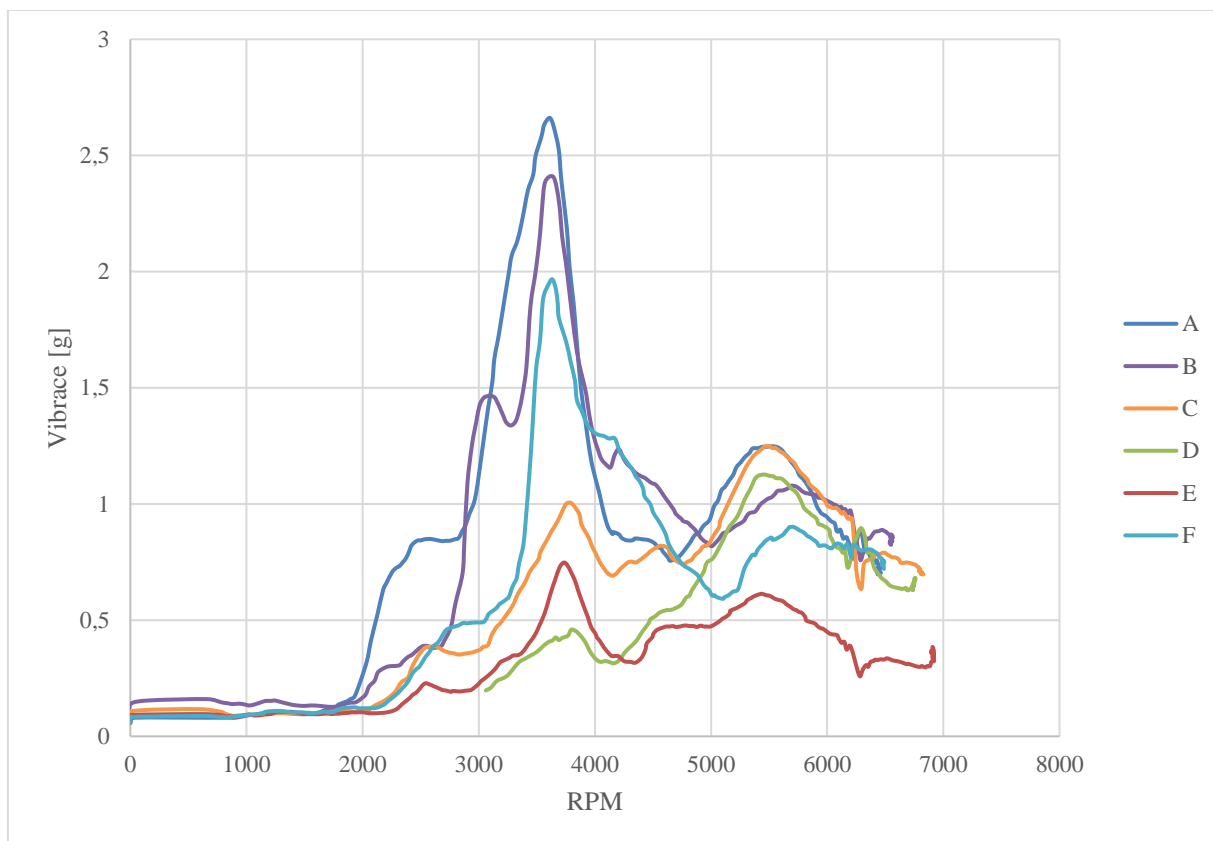


Graf 4 Tah testovaných vrtulí



Graf 5 Kroučící moment testovaných vrtulí

Dalším měřeným parametrem jsou vibrace, které mají velký vliv na efektivitu a celkovou funkčnost vrtule. Vysoké hodnoty vibrací jsou velice nežádoucí, protože mohou vést k buzení vlastní frekvence konstrukce letounu, která může poškodit zařízení nebo jej v krajním případě úplně zničit. Vibrace mohou negativně ovlivnit i samotné výsledky činnosti prováděné právě za pomoci multikoptéry, například při focení, natáčení nebo scanování zemského povrchu.

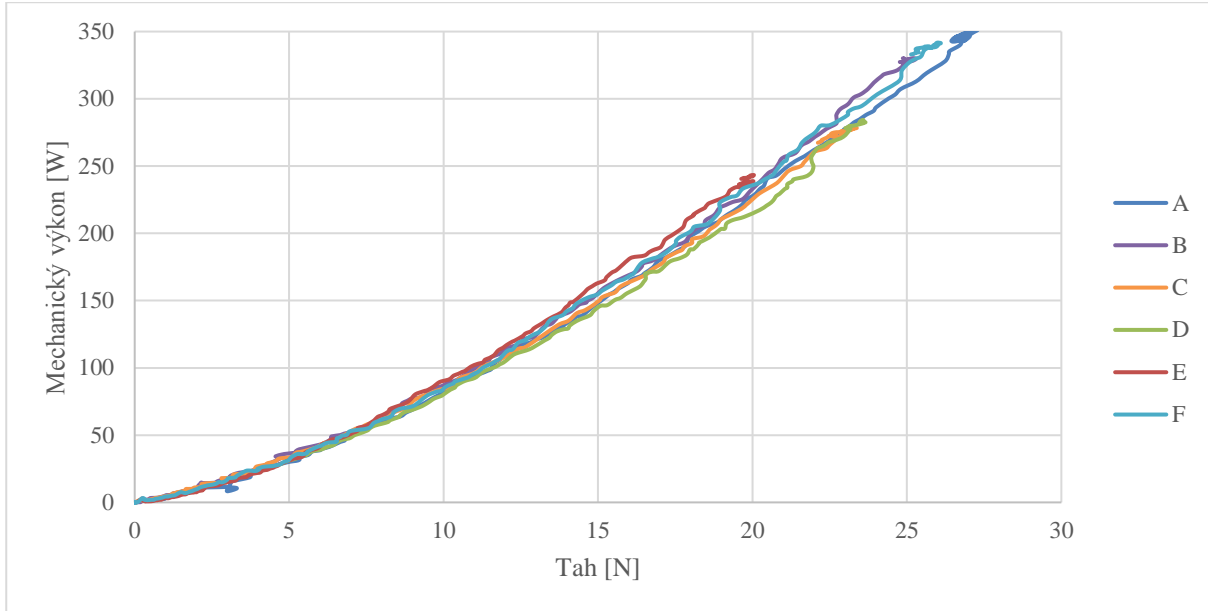


Graf 6 Vibrace testovaných vrtulí

Z Grafu 6 je zřejmé, že průběhy vibrací v závislosti na otáčkách jsou pro všechny testované vrtule velice podobné, liší se pouze svojí velikostí. Výrazné vibrační maxima nastávají v intervalu otáček od 3000RPM do 4000RPM. Vibrační maxima jsou iniciována na začátku tohoto intervalu, tj. okolo 3000RPM. Další lokální maximum vibrací nastává v intervalu od 5000RPM do 6000RPM, kde však již není tak výrazné. Problematika vibrací bude detailněji popsána v Kapitole 6.2 po provedení analýzy pohybu vrtule.

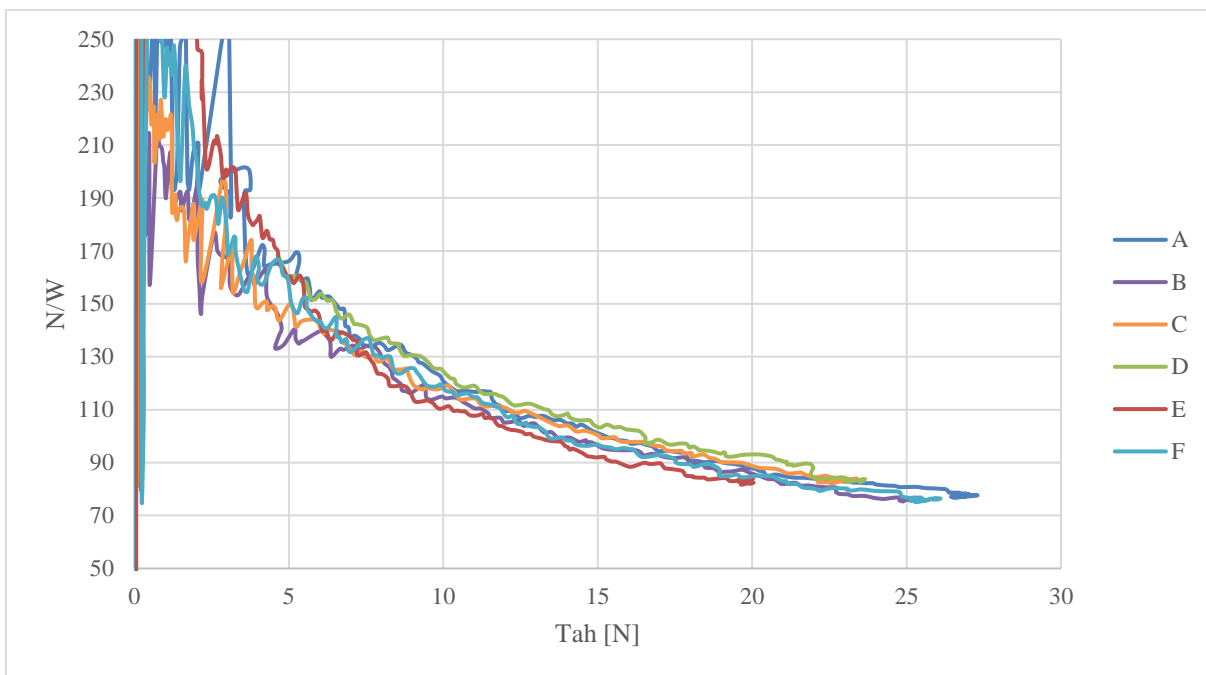
Z naměřených hodnot krouticího momentu a otáček, můžeme dopočítat potřebný mechanický výkon na hřídeli při zvoleném tahu. Vzorec pro výkon na hřídeli je následující:

$$P_{\text{mechanický}} = M\omega, \quad (62)$$



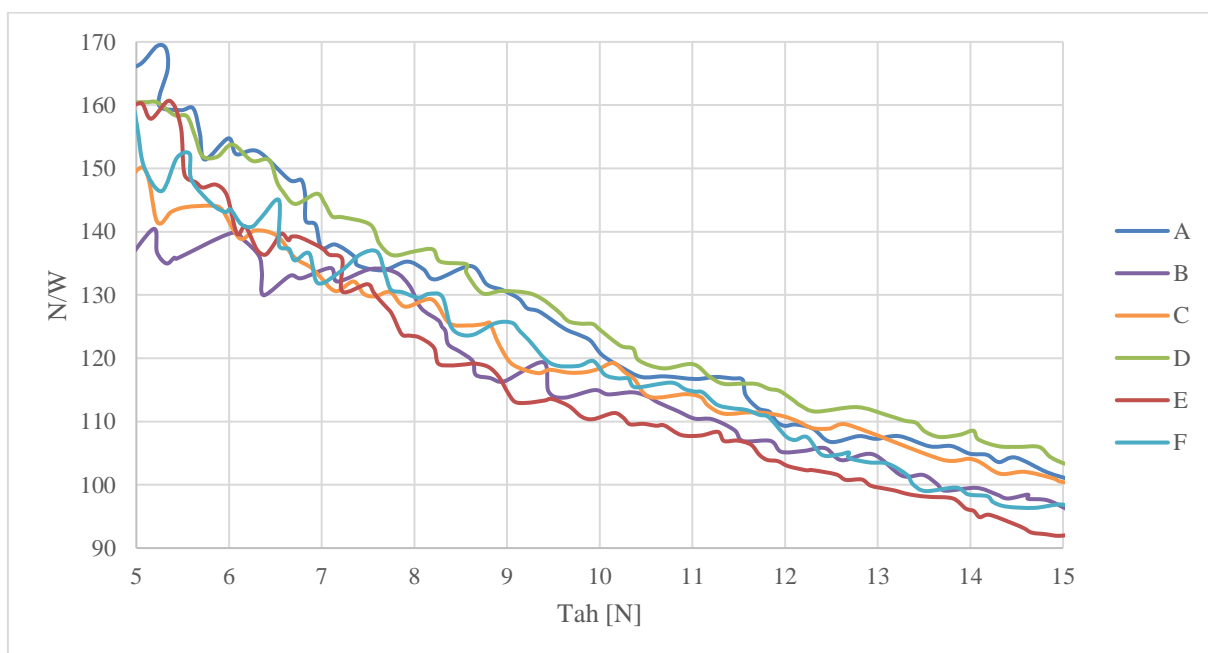
Graf 7 Mechanický výkon testovaných vrtulí

Mechanický výkon v závislosti na tahu vyjadřuje účinnost vrtule, kdy efektivita vrtule roste s klesající potřebným mechanickým výkonem pro sledovanou hodnotu tahu. Pro ještě výraznější znázornění efektivity vrtule můžeme použít poměr N/W v závislosti na tahu. Jelikož každá z vrtulí generuje jiný tahu při stejných otáčkách, nemůžeme použít závislost N/W a otáček.

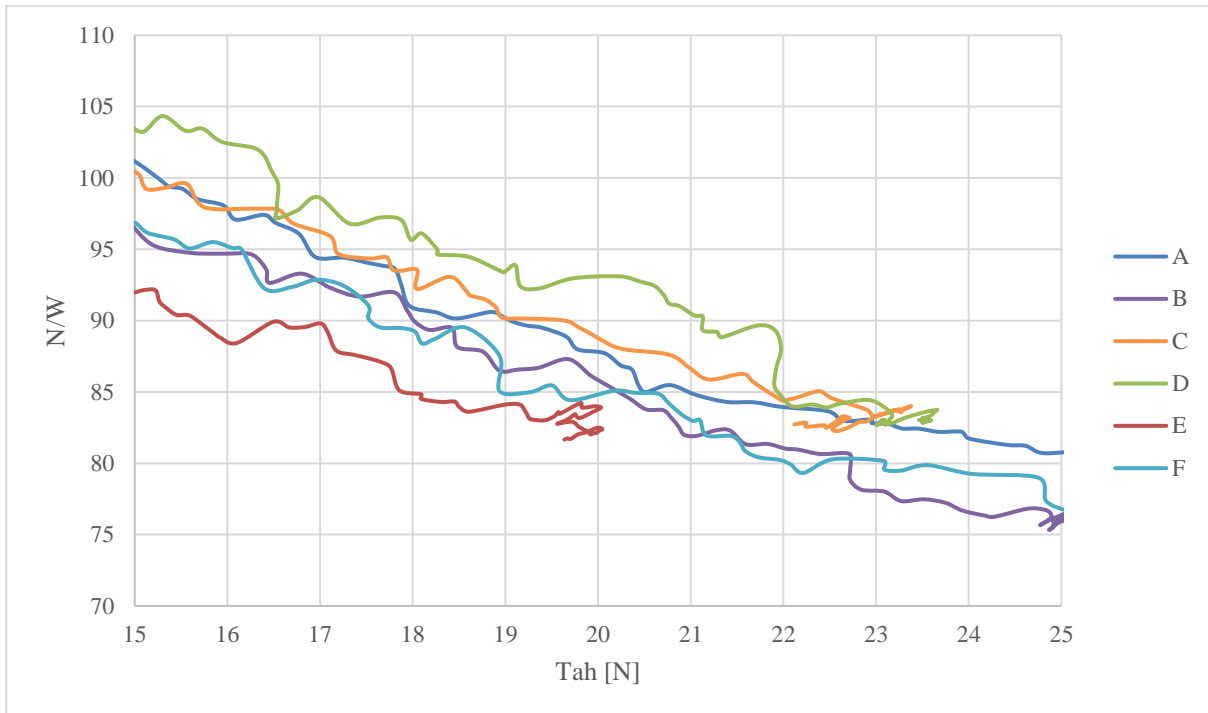


Graf 8 Efektivita testovaných vrtulí

Pro zřetelnější výsledky efektivity jednotlivých vrtulí byl graf efektivity vrtule v závislosti na tahu rozdělen do dvou detailnějších grafů pro zvolené intervaly tahu.



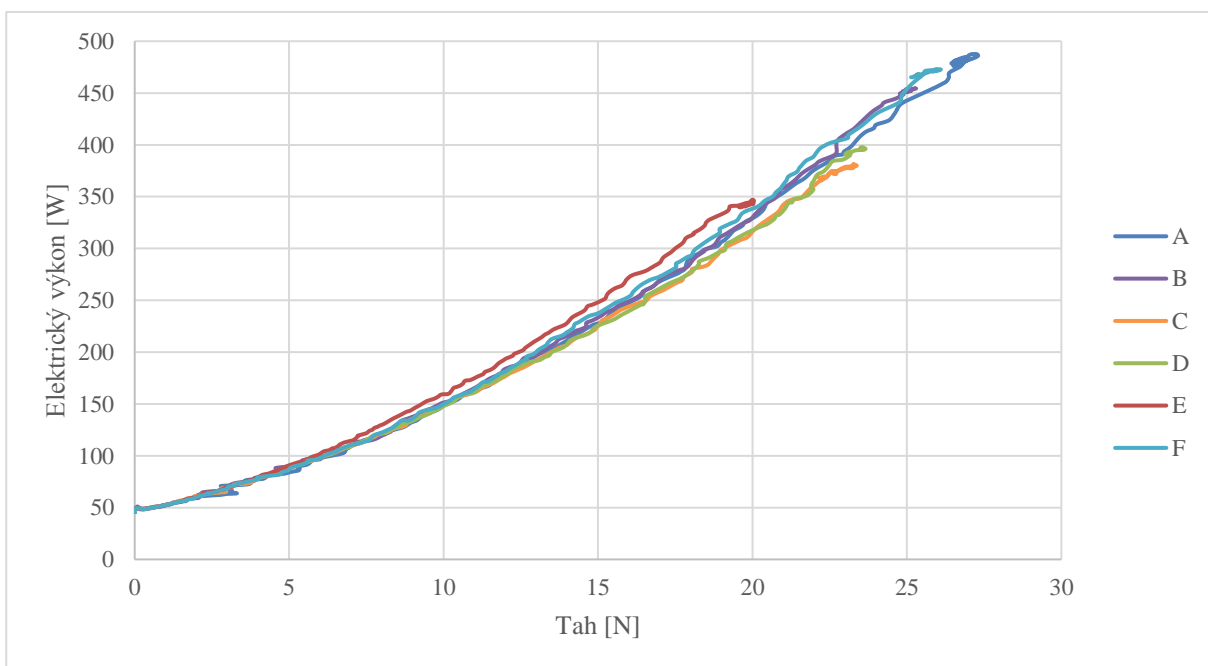
Graf 9 Efektivita testovaných vrtulí (interval tahu 5 - 15N)



Graf 10 Efektivita testovaných vrtulí (interval tahu 15 – 25N)

Pro uživatele letounu je však nejdůležitější celkový elektrický výkon potřebný pro zvolený tah, jelikož určuje celkovou dobu letu. Tento elektrický výkon zahrnuje i efektivitu motoru, tedy efektivitu kombinace motor – vrtule. Dopočítáme jej ze součinu elektrického proudu a napětí

$$P_{elektrický} = U \cdot I \quad (63)$$



Graf 11 Elektrický výkon testovaných vrtulí

Úkolem této práce však není najít vhodnou a efektivní kombinaci motor – vrtule, proto je funkce těchto výsledků pouze informativní.

Analýza odhalila nejefektivnější vrtuli, jedná se o vrtuli D. Důvodem nejvyšší efektivity (N/W) je především nižší zatížení disku v porovnání s ostatními vrtulemi, jelikož plocha disku je u této vrtule největší a generovaný tah je v porovnání s většinou ostatních vrtulí nižší. Dalším důvodem může být samozřejmě i vyšší poměr součinitelů c_L/c_D jednotlivých profilů listu a celkové rozložení vztlaku po délce listu. Tato tvrzení však bez přesné geometrie listu není možno potvrdit.

6 ANALÝZA POHYBU VRTULE

Pro analýzu deformace vrtule při rotaci a pro změnu polohy listu vůči centrálnímu unášeči byla použita metoda digitální korelace obrazů (systém GOM Aramis). Jelikož je tato metoda velice časově a finančně náročná, byly vybrány pouze tři testované vrtule, které byly zanalyzovány, konkrétně se jedná o vrtule A, B, C.

6.1 DIGITÁLNÍ KORELACE OBRAZŮ

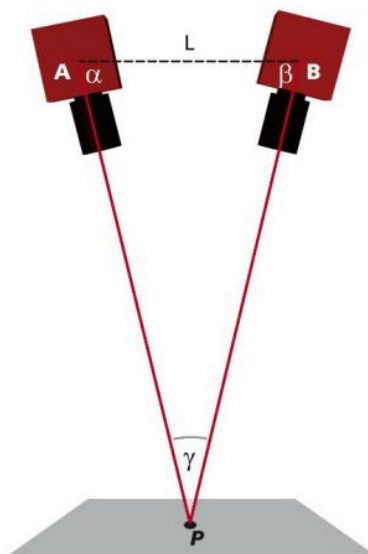
Jedná se o metodu, která je založená na šedých digitálních obrazech, na kterých je za pomoci markerů možno vidět posunutí objektu při zátěži. Díky rychlému rozvoji HD kamer, je možné využít tuto metodu pro statické, ale i dynamické případy zatížení. S rozvojem výpočetní techniky se stala tato metoda uznávanou a užitečnou metodou měření deformačních analýz [10].

6.1.1 PRINCIP DIGITÁLNÍ KORELACE

Za použití stereoskopického sensoru je každý bod pozorovaného objektu reprezentován daným pixelem v rovině obrazu příslušného sensoru. Pomocí znalosti zobrazovacího parametru každého sensoru a znalosti polohy sensorů vůči sobě, může být dopočítána poloha jakéhokoli bodu pozorovaného objektu v trojrozměrném prostoru [10].

Poloha pozorovaného bodu objektu je určena použitím korelačních algoritmů, které zpracovávají polohu bodu ze dvou obrazů. Při této analýze byly použity markery, které byly rozmístěny na určitá místa vrtule. Pro nadefinování polohy centrálního unášeče byl na každou vrtuli použit speciální adapter, který byl uchycen k unášeči a na svém povrchu nesl pět markerů. Další dva markery byly aplikovány v místě s maximální šířkou listu. A poslední marker byl nalepen na konec listu [10].

Z naměřených dat lze určit pootočení listu vůči poloze centrálního unášeče, průhyb listu na jeho konci a zkroucení listu v místě s maximální šířkou.



Obrázek 24 Schéma stereoskopického senzoru [11]

6.2 VÝSLEDKY ANALÝZY POHYBU VRTULE

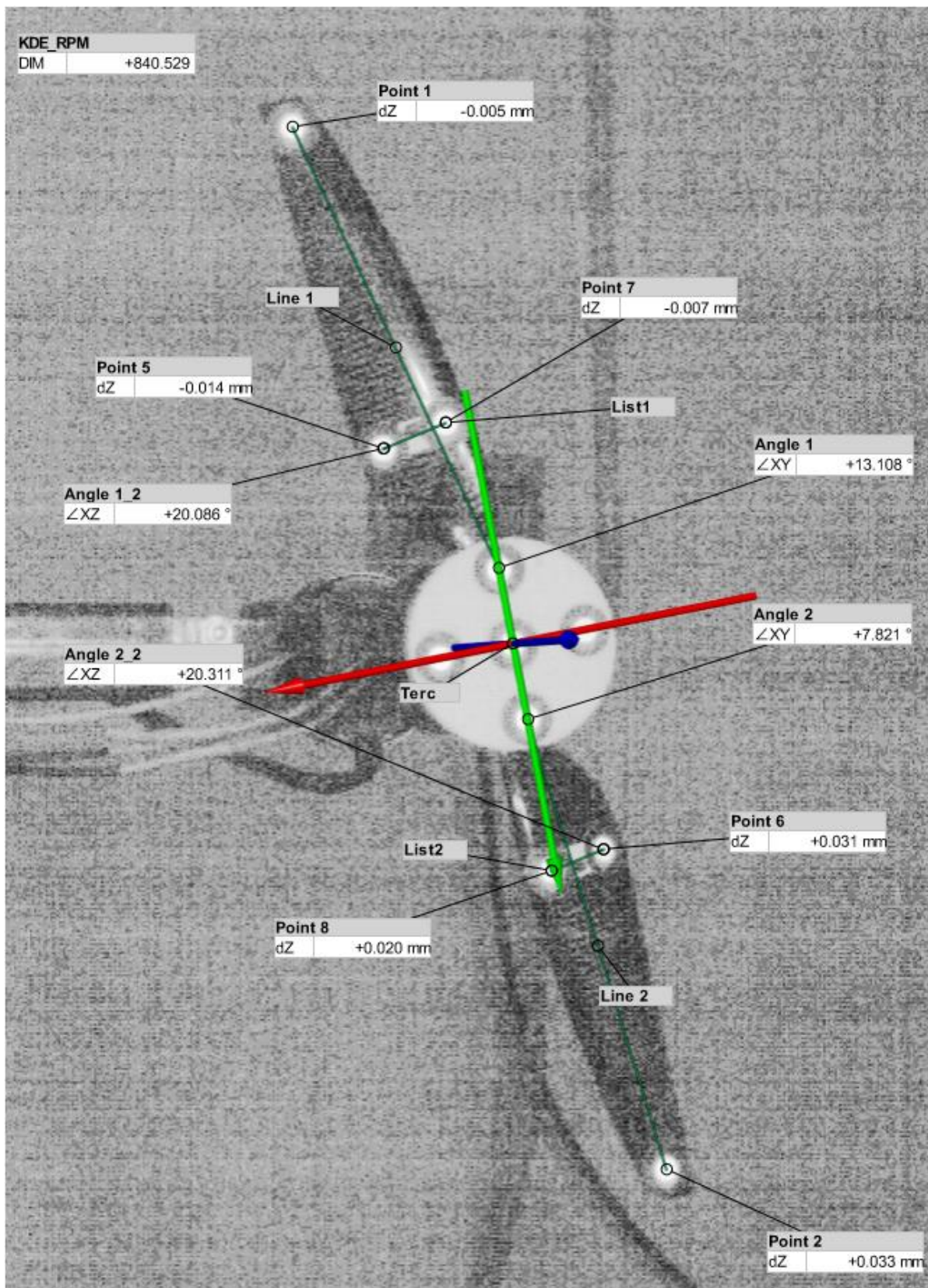
Abychom byli schopni analyzovat změnu polohy částí vrtule, je nutné si nadefinovat souřadnicový systém. Souřadnicový systém je orientovaný tak, že osa X prochází středem unašeče a středy krajních otvorů pro uchycení listů, osa Y prochází středem unašeče a je k ose X kolmá. Obě osy tedy leží v rovině disku vrtule. Osa Z prochází středem unašeče a je k rovině disku vrtule kolmá.

Na Obrázku 25 je jedna z testovaných vrtulí s markery a středovým adapterem. Vrtule byly testovány v ustálených režimech otáček od 2000 RPM do 6000RPM, tento interval byl definován doporučenými operačními otáčkami vrtule a maximální možnou frekvencí pořizování snímků systémem GOM Aramis. Dále byla provedena analýza rozběhu vrtule z 0 RPM do 4500 RPM.



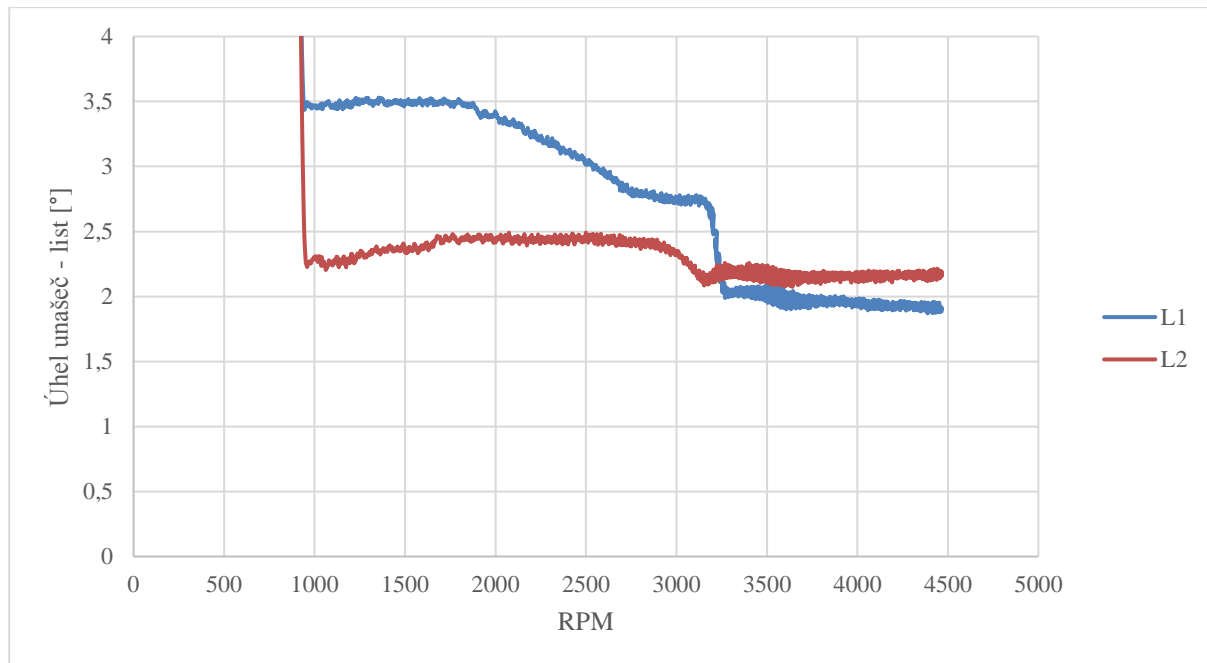
Obrázek 25 Testovaná vrtule s markery

Jak již bylo zmíněno, při dynamickém zatížení bylo měřeno pootočení listu vůči unašeči, tedy úhel mezi osou X a přímkou procházející středem unašeče a bodem na konci listu (Angle 1 a Angle 2), úhel zkroucení listu v místě s maximální šířkou (Angle 1_2 a Angle 2_2) a prohnutí listu, především na jeho konci (Point 1, Point 2).



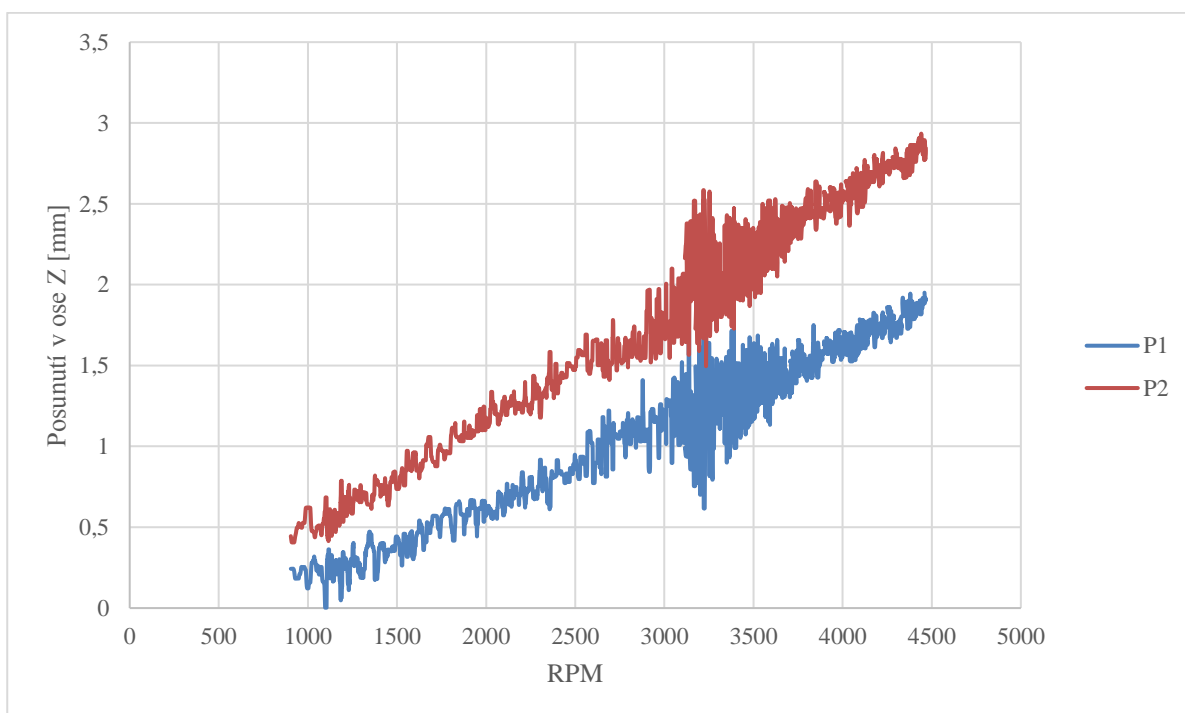
Obrázek 26 Testovaná vrtule B se všemi měřeními parametry

Analýza ukázala, že při plynulém rozběhu vrtule z 0 RPM na 4500 RPM, je vždy jeden z listů pootočen výrazněji vůči unašeči. Při otáčkách okolo 3200 RPM dochází k náhlému snížení úhlu pootočení tohoto listu. Popsaný průběh je charakteristický pro všechny tři měřené vrtule, liší se pouze samotná velikost jednotlivých úhlů vychýlení.



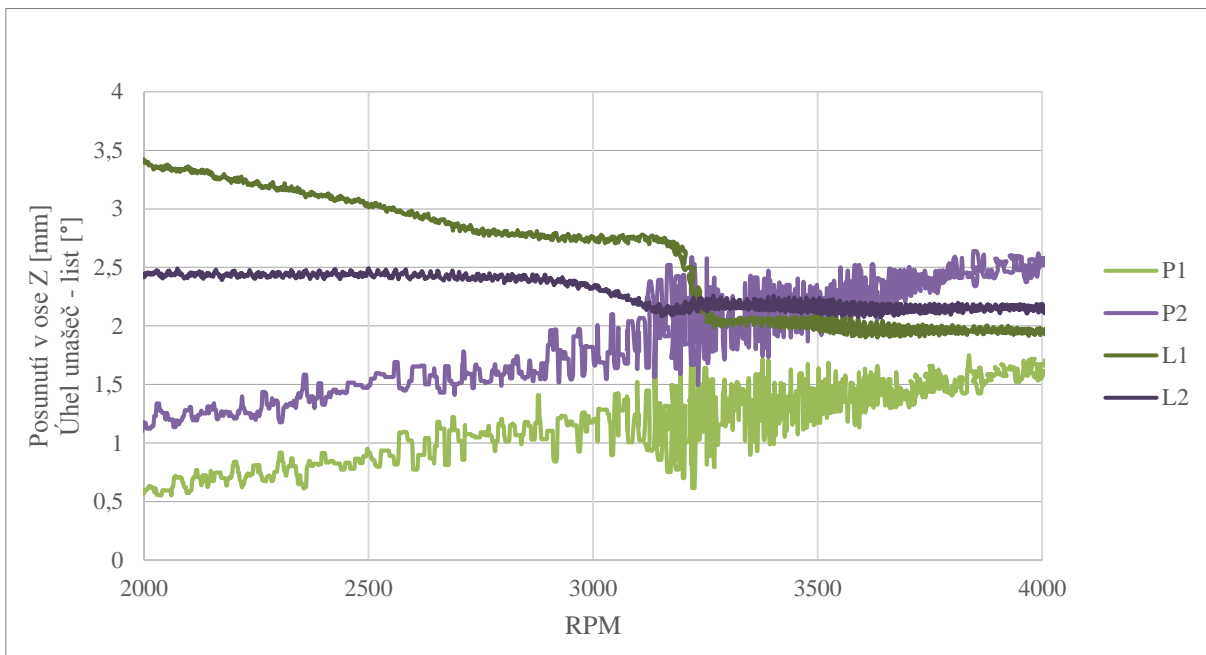
Graf 12 Závislost pootočení listu 1 a listu 2 vůči unašeči (vrtule B)

Během otáček, při kterých dochází ke snížení úhlu pootočení listu vůči unašeči, je také pozorovatelné výraznější kmitání bodů 1 a 2 (vibrace).



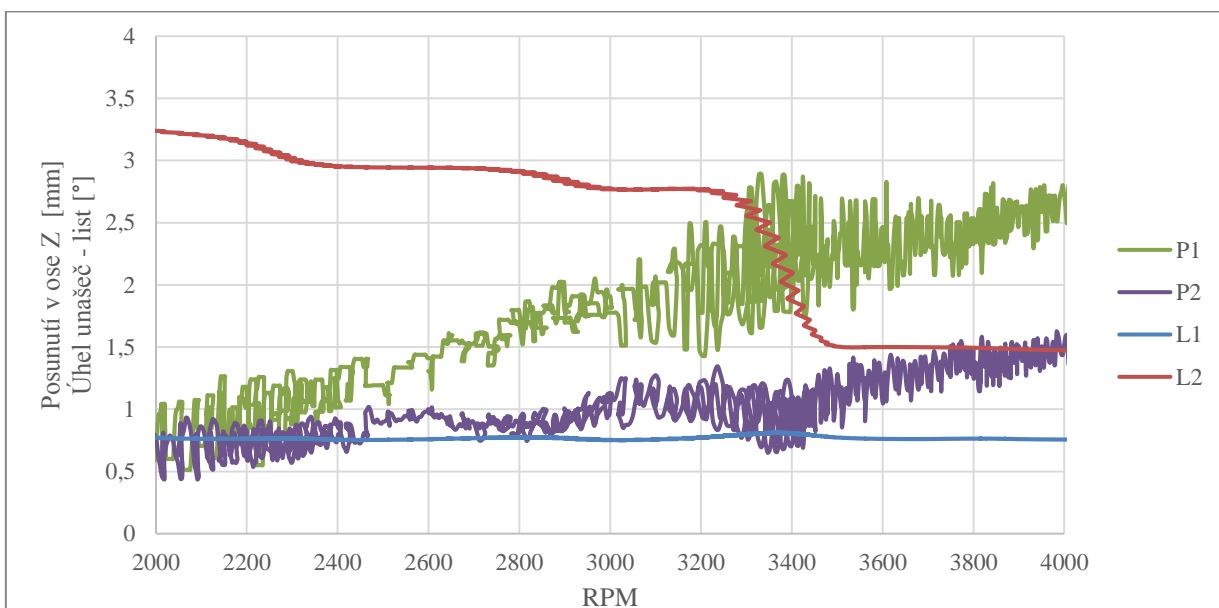
Graf 13 Posunutí bodů na koncích listů (vrtule B)

Pokud spojíme tyto dva grafy dohromady, dostaneme zajímavou závislost mezi snížením úhlu pootočení lisu vůči unašeči a vibracemi vrtule.



Graf 14 Kombinace posunutí a pootočení lisu (vrtule B)

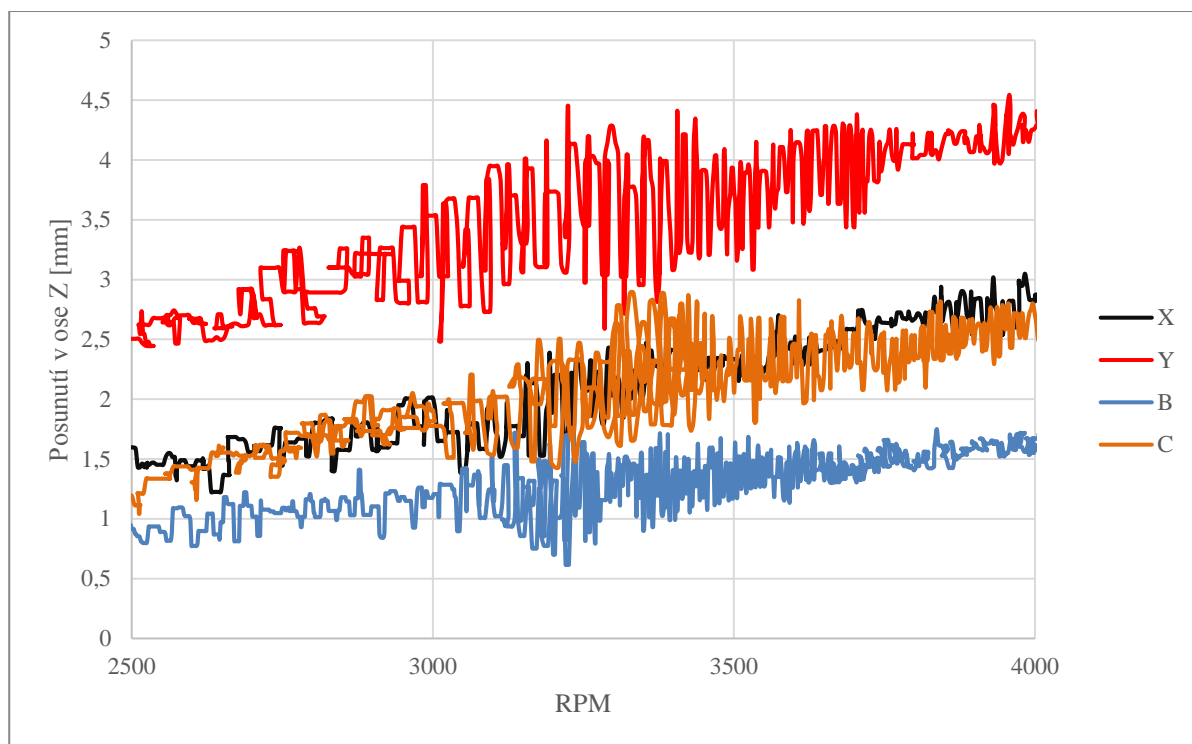
Celý proces snížení úhlu pootočení lisu vůči unašeči je iniciován vibracemi, které při svém zesílení uvolňují uchycení lisu vrtule v centrálním unašeči. Uvolněný list se během zesílených vibrací srovnává do podobné polohy, ve které se nachází druhý list, u kterého nedochází k výraznějším změnám. Lépe pozorovatelná změna úhlu pootočení lisu vůči centrálnímu unašeči je zznorněna na Grafu 15. Stejně chování vrtule bylo naměřeno u všech ostatních testovaných vrtulí.



Graf 15 Kombinace posunutí a pootočení lisu (vrtule C)

Důležitou otázkou je samotný zdroj vibrací vrtule. První zvažovanou domněnkou byla vlastní frekvence měřicího standu. Tato myšlenka však byla vyvrácena, jelikož k zesílení vibrací u jednotlivých vrtulí nedocházelo při úplně totožných otáčkách (odlišná frekvence). Vrtule byly navíc testovány na dvou různých měřicích zařízeních s odlišnou konstrukcí a průběhy vibrací byly totožné.

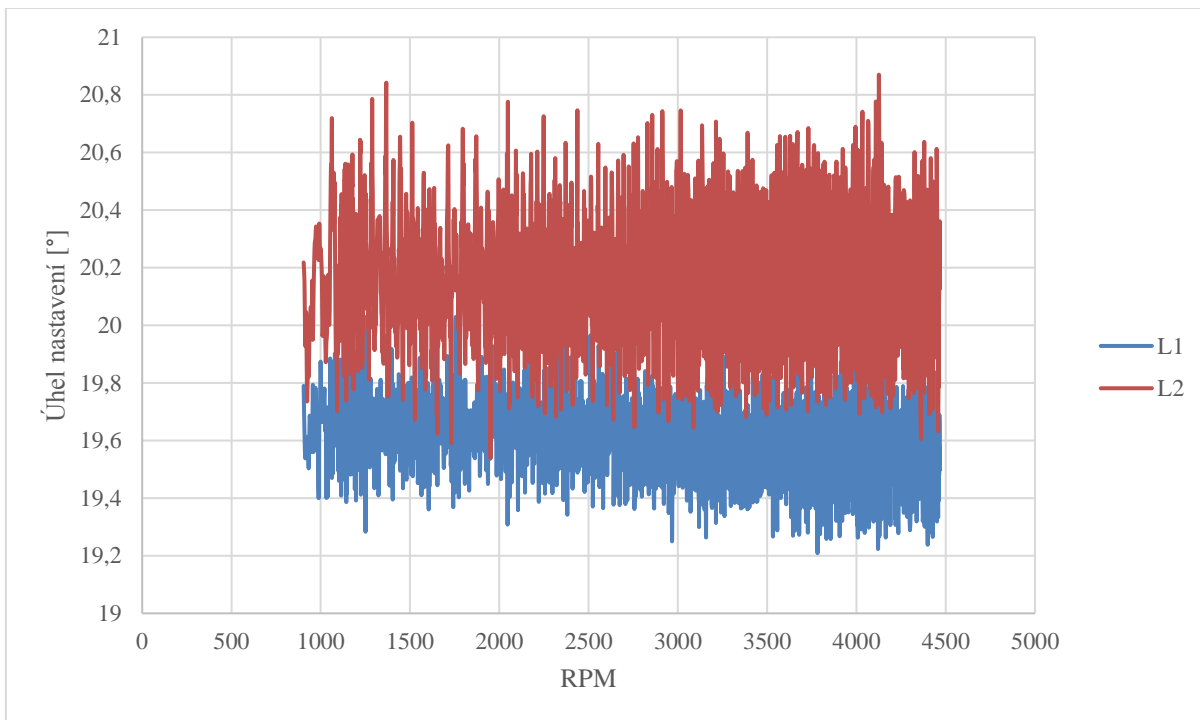
Dalším zvažovaným zdrojem vibrací je vlastní frekvence listu vrtule. Jak již bylo zmíněno, otáčky iniciace zesílení vibrací se pro jednotlivé vrtule mírně liší. Graf 16 popisuje oblast zesílení vibrací pro čtyři různé vrtule, konkrétně testované vrtule B a C, a také vlastní návrh vrtule bez polyuretanového jádra X a s polyuretanovým jádrem Y, o kterých bude pojednáno později.



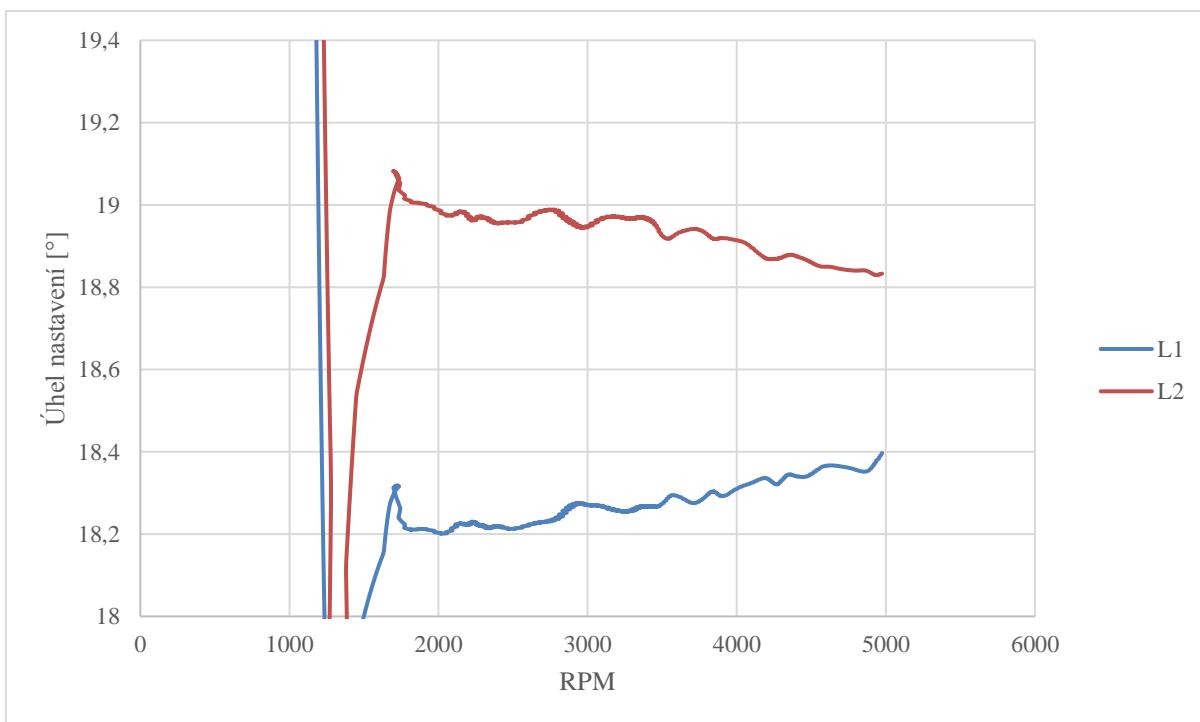
Graf 16 Oblast iniciace vibrací u vybraných vrtulí

Z Grafu 16 vyplývá, že s rostoucí tuhostí listu (menší posunutí koncového bodu listu v ose Z), rostou i otáčky iniciace vibrací. Tento fakt podporuje teorii, že se jedná o vlastní frekvenci vrtule, jelikož s rostoucí tuhostí soustavy by měla růst i její vlastní frekvence. Pro určení vlastní frekvence listu vrtule byla provedena modální analýza, o které bude pojednáno v Kapitole 7.9.

Analýza také odhalila výrazné rozdíly v úhlu nastavení a jeho stálosti při zatížení listu. Zatímco u testovaných vrtulí A a B dochází k oscilaci úhlu nastavení kolem určité střední hodnoty, u vrtule C dochází pouze ke zkroucení listu při nárůstu zatížení. Z Grafu 18 je také zřejmé, že má vrtule snahu srovnat oba úhly nastavení jednotlivých listů na stejnou hodnotu. Což potvrzuje i další test, který je popsán níže.

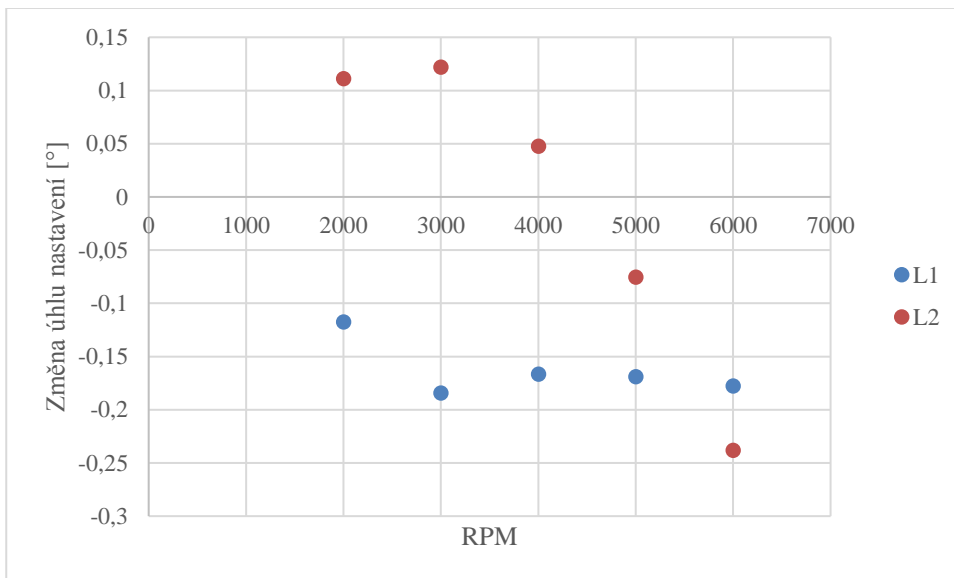


Graf 17 Změna úhlu nastavení listu 1 a listu 2 (vrtule B)

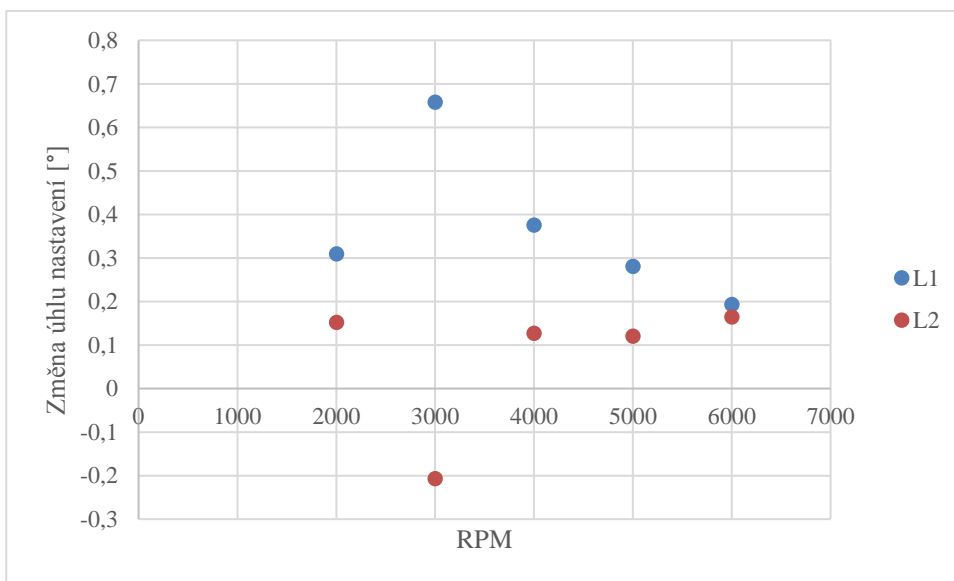


Graf 18 Změna úhlu nastavení listu 1 a listu 2 (vrtule C)

Změna úhlu nastavení byla sledována i při ustálených otáčkách. Konkrétně se jednalo o otáčky 2000RPM, 3000RPM, 4000RPM, 5000RPM a 6000RPM. Daný úhel nastavení byl sledován během jedné otáčky a naměřené hodnoty byly posléze zprůměrovány. Zatímco u vrtule B je změna úhlu nastavení listu výraznější pouze u jednoho listu, u vrtule C jsou změny úhlu nastavení podobné pro oba listy, pouze opačně orientované.

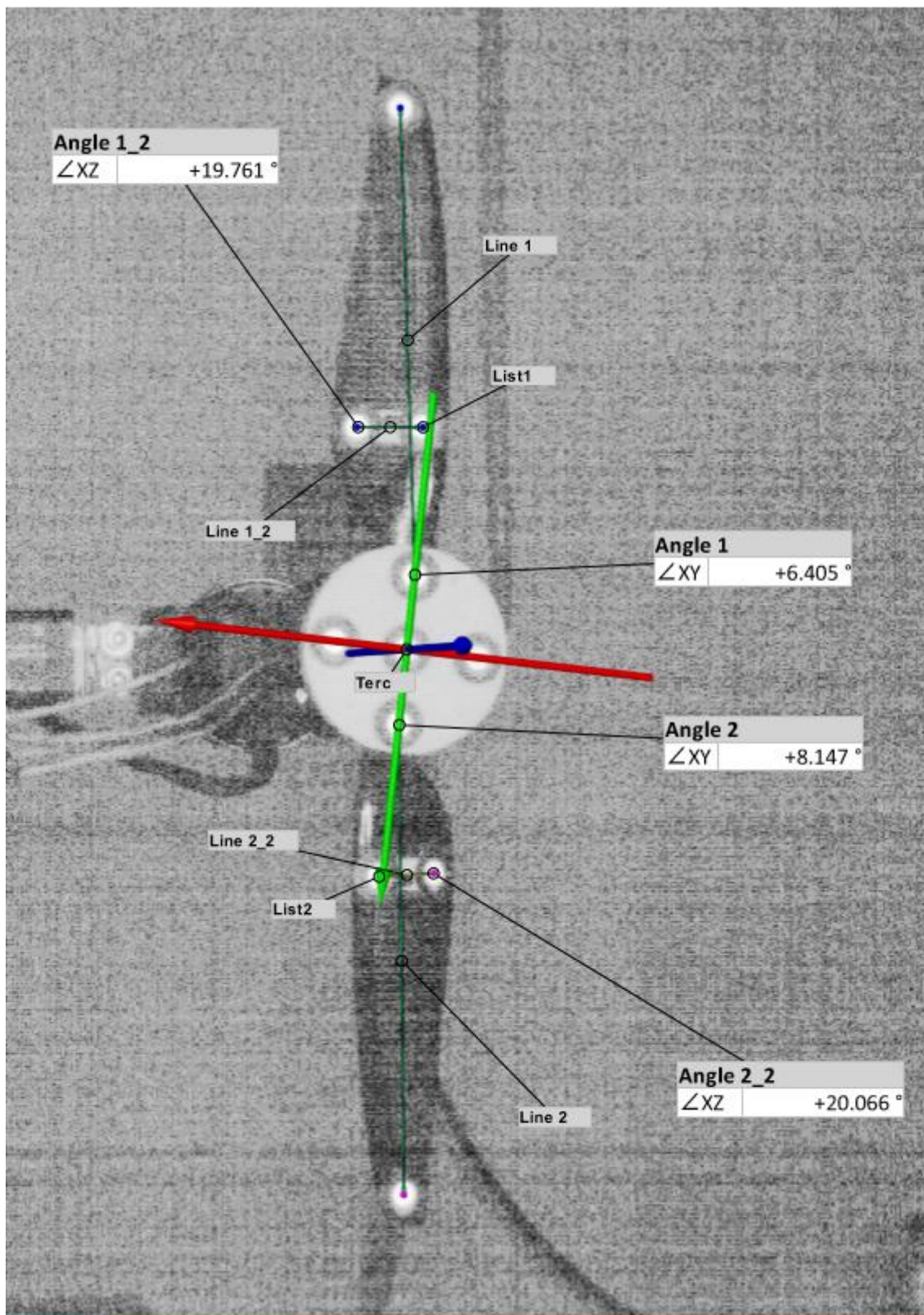


Graf 19 Změna úhlu nastavení při ustálených otáčkách (vrtule B)



Graf 20 Změna úhlu nastavení při ustálených otáčkách (vrtule C)

Výše popsané chování úhlů nastavení listů vrtulí může být způsobeno hned několika příčinami. První z nich je torzní tuhost listu vrtule, centrálního unašeče a celého systému vrtule. Dalším důvodem může být přesnost uchycení listu vrtule v unašeči, tedy velikost vůlí ve spoji unašeč – list. Důležitá je také vzájemná pozice těžiště, aerodynamického středu a elastického středu v jednotlivých řezech listu. Při jejich nevhodném uspořádání může totiž docházet k tzv. třepotání.



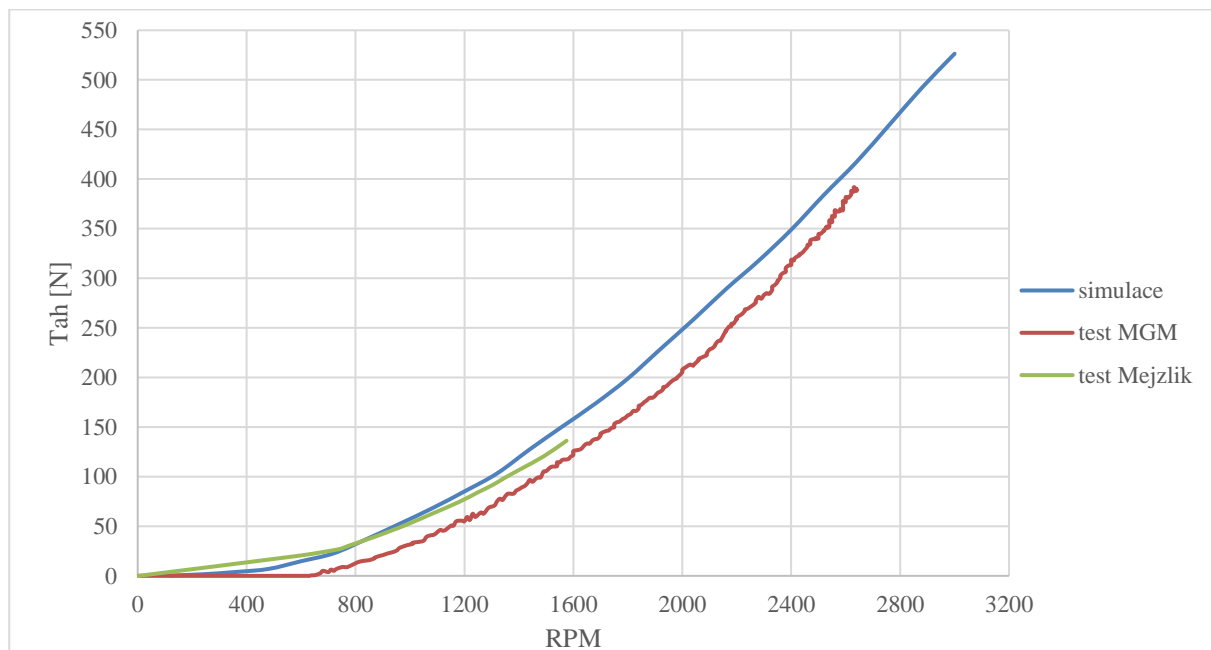
Obrázek 27 Testovaná vrtule B s počátečními úhly nastavení při 0 RPM

7 NÁVRH VRTULE

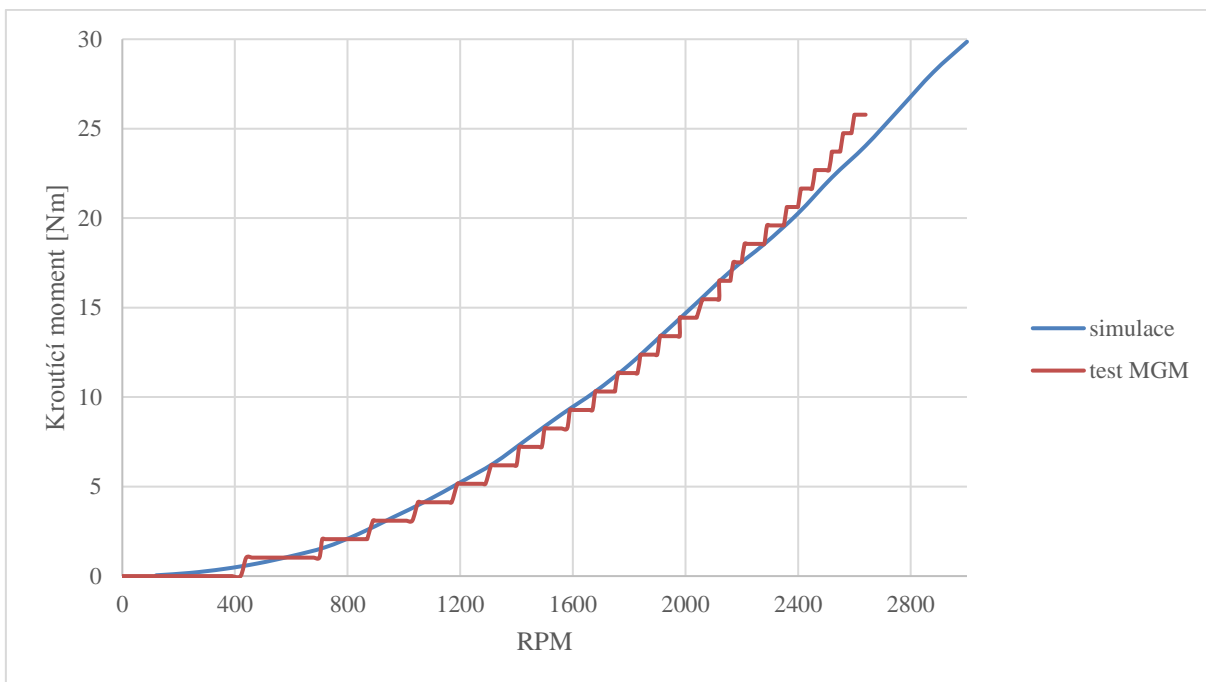
V této kapitole bude popsán vlastní návrh vrtule. Od provedení simulace, přes 3D model až k výrobě finálního produktu. Součástí této části bude i porovnání simulovaných parametrů s reálnými testovanými hodnotami.

7.1 MECAFLUX HELICIEL

Pro návrh tvaru listu vrtule byl použit software Mecaflux Heliciel. Jedná se o matematický model, který pracuje na základě teorie elementu listu. Pomocí tohoto matematického modelu již byly vyrobeny vrtule a odchylka simulací od reálných testů se pohybuje okolo 10 až 15 %. Následující grafy verifikují správnost matematického modelu simulace. Testovaná vrtule je třílistá, s průměrem 1075mm.



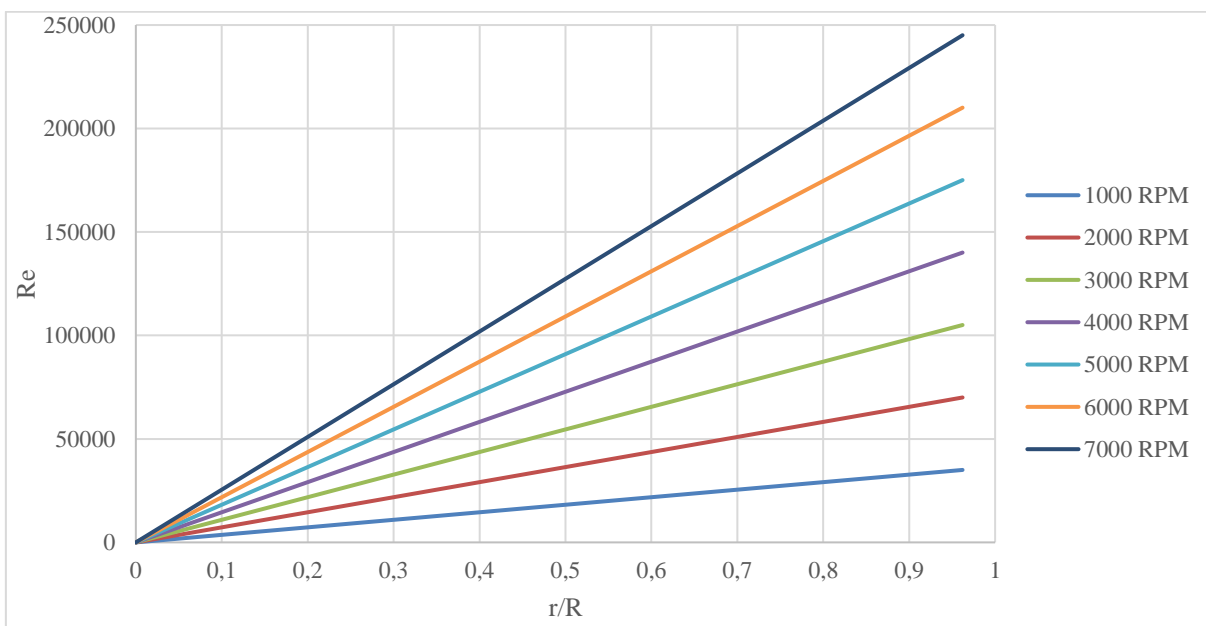
Graf 21 Porovnání simulace tahu s reálným testem



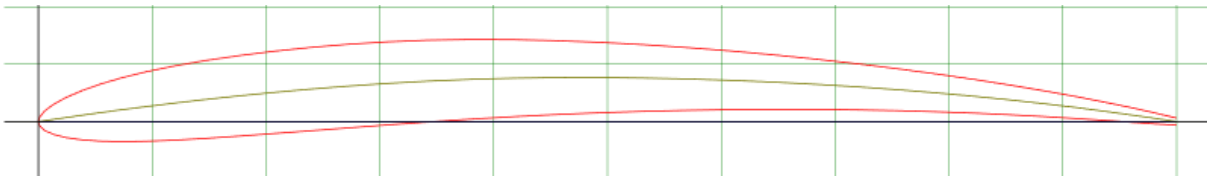
Graf 22 Porovnání simulace krouticího momentu s reálným testem

7.2 VOLBA PROFILU LISTU

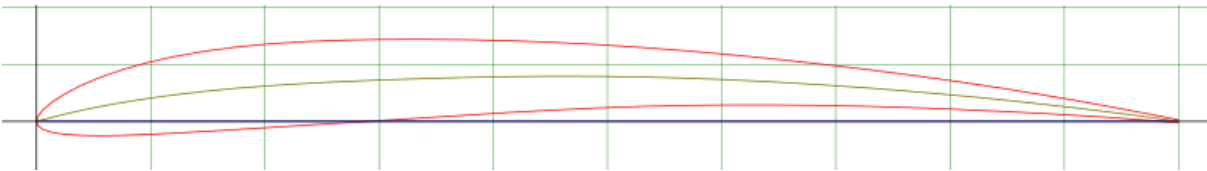
Jelikož je hlavním parametrem listu jeho efektivita, bylo vybíráno z databáze profilů používaných pro vrtule modelářské letouny, soutěžících v maximální délce doletu. Konkrétně se jedná o profily A18, BE50, GM15, MA409 a NACA 6409. Tyto profily patří k profilům pro nízká Reynoldsova čísla. Následující graf popisuje závislost Reynoldsova čísla na otáčkách a poloměru řezu listu. Při výpočtu byla použita odhadovaná průměrná hodnota šířky listu 25 mm.



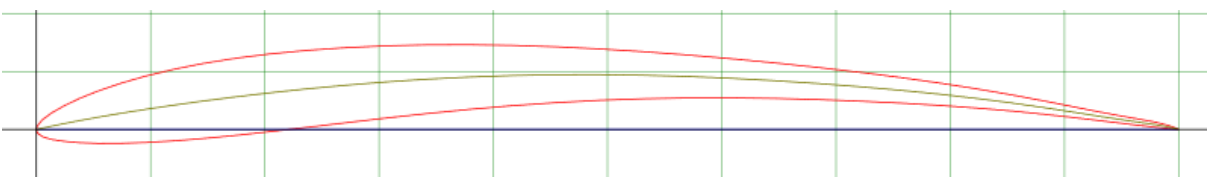
Graf 23 Závislost Re na otáčkách a vzdálenosti od středu rotace



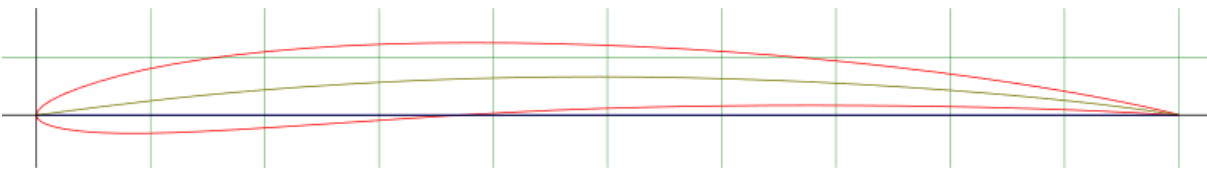
Obrázek 28 Profil A18 [12]



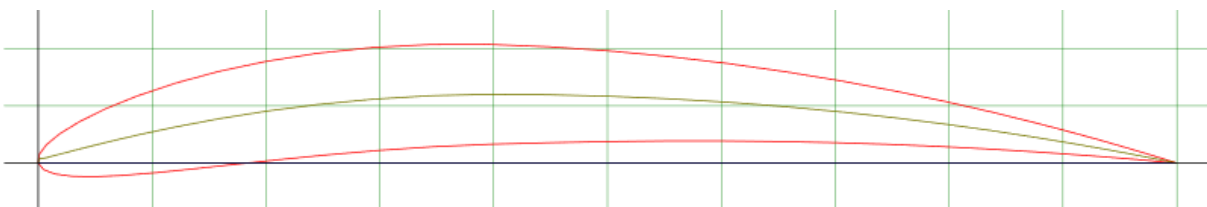
Obrázek 29 Profil BE50 [12]



Obrázek 30 Profil GM15 [12]

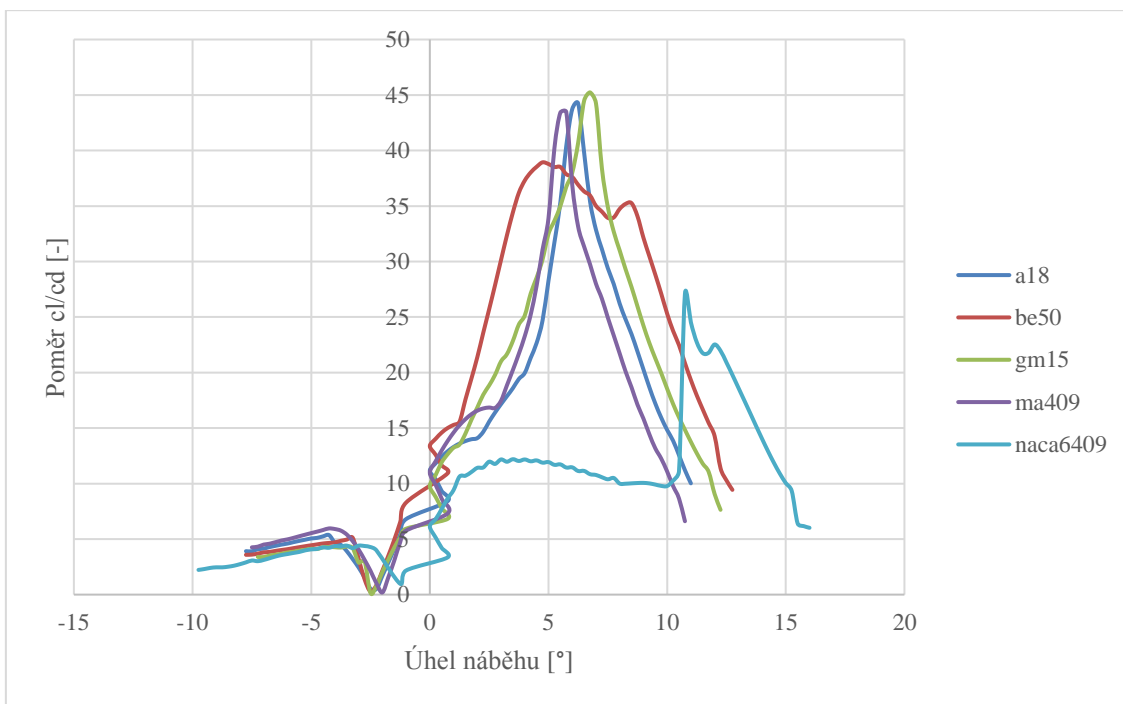


Obrázek 31 Profil MA409 [12]

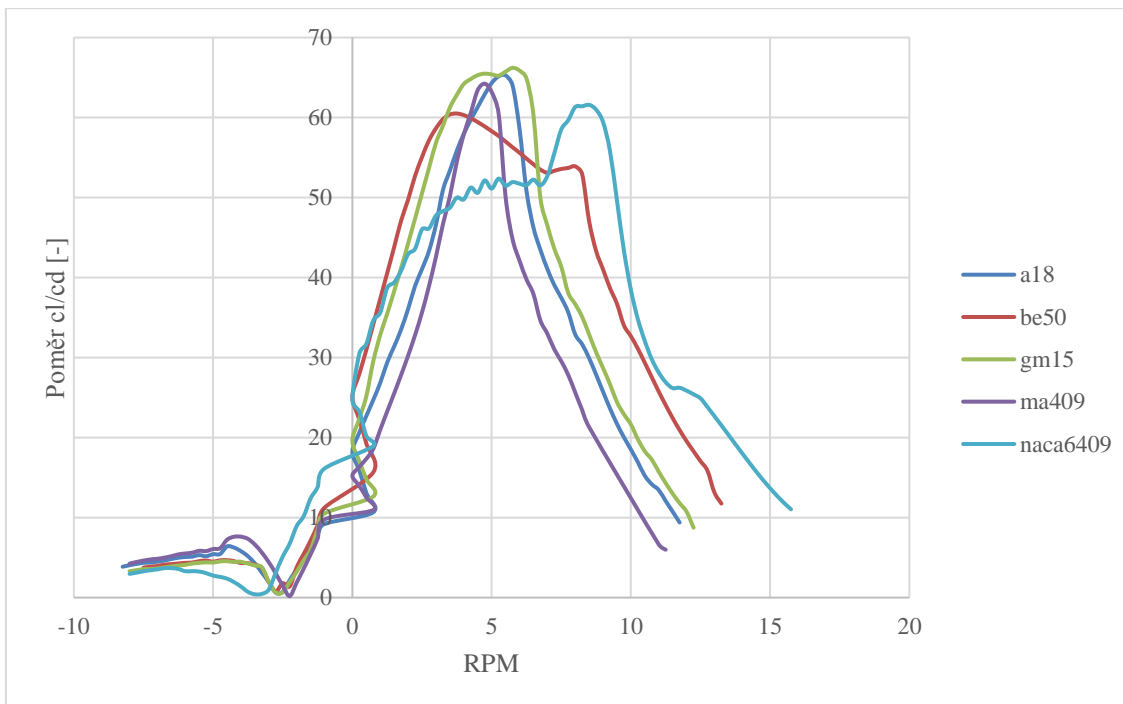


Obrázek 32 Profil NACA 6409 [12]

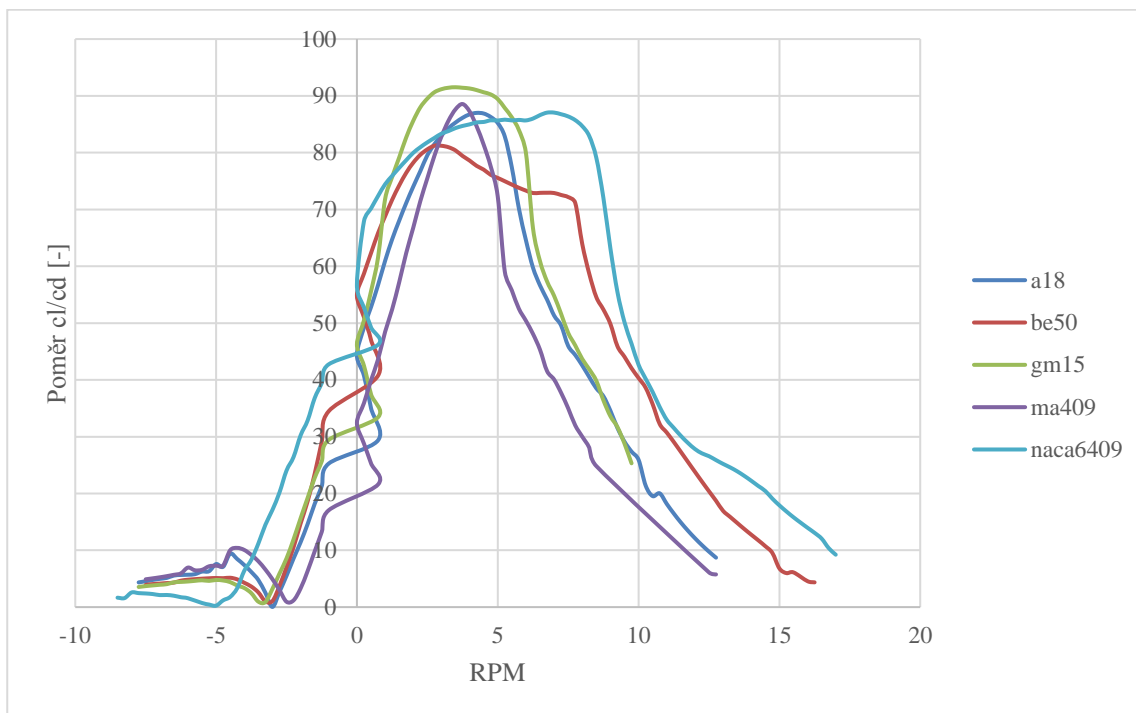
U jednotlivých profilů bylo pomocí softwaru Xfoil provedena analýza součinitelů vztlaku a odporu v závislosti na úhlu náběhu pro Re 50 000, 100 000 a 200 000. Následující grafy popisují závislost poměru c_l/c_d a úhlu náběhu.



Graf 24 Poměr c_l/c_d vybraných profilů při Re 50 000



Graf 25 Poměr c_l/c_d vybraných profilů při Re 100 000



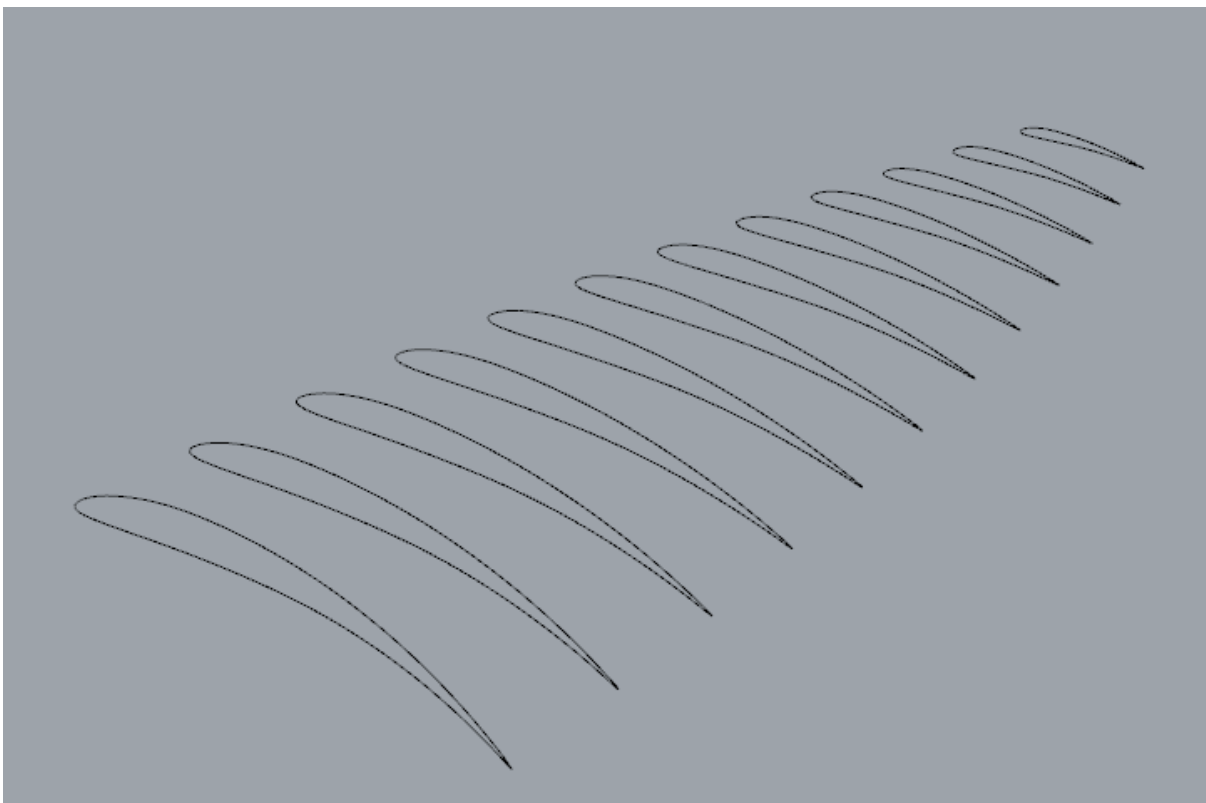
Graf 26 Poměr c_l/c_d vybraných profilů při $Re\ 200\ 000$

Z výše zmíněných grafů profilů byl vybrán profil BE50, který sice nemá nejvyšší hodnotu poměru c_l/c_d , ale maximální hodnota c_l/c_d je téměř konstantní pro širší interval úhlu náběhu, takže při změně úhlu náběhu, způsobené dynamickým zatížením vrtule, by měla být zachována efektivnost vrtule.

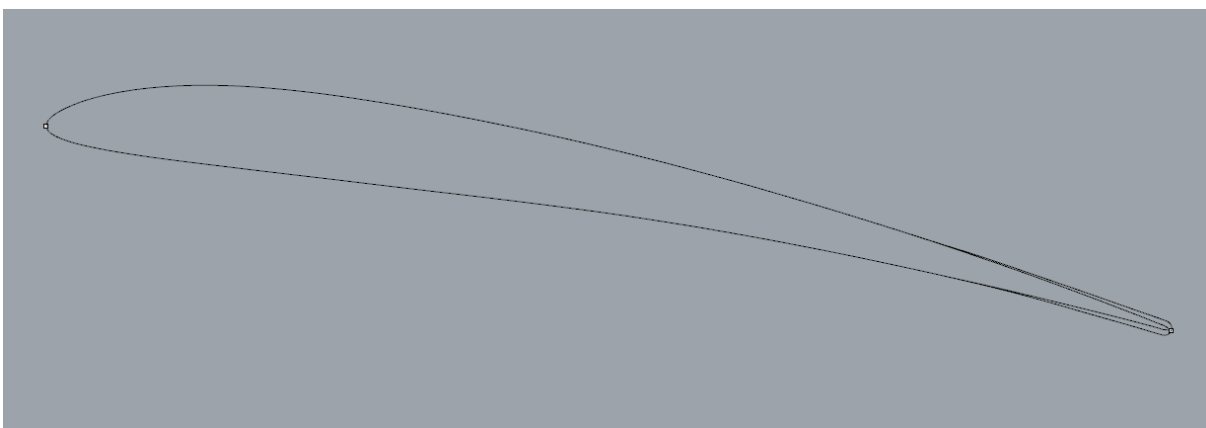
7.3 MODEL LISTU

Pomocí matematického modelu bylo vytvořeno 14 jednotlivých řezů listu vrtule. Vstupními parametry byly: souřadnice zvoleného profilu, optimální pracovní otáčky, délka tětiny kořenového a koncového profilu, vzdálenost kořenového a koncového profilu od středu rotace a hustotu prostředí. Následně byla dopočítána Reynoldsova čísla pro jednotlivé řezy a provedeno první nastavení řezů po délce listu. Z této geometrické charakteristiky byla dopočítána indukovaná rychlost, která mění úhel náběhu proudu. Z tohoto důvodu byly původní úhly nastavení upraveny a celá operace probíhá znovu. Po určitém počtu iterací bylo dosaženo optimálního nastavení profilů, tedy maximálních poměrů c_l/c_d . Proto byly vygenerovány teoretické hodnoty tahu a kroutícího momentu, které byly doplněny o faktor ztrát na konci listu vrtule.

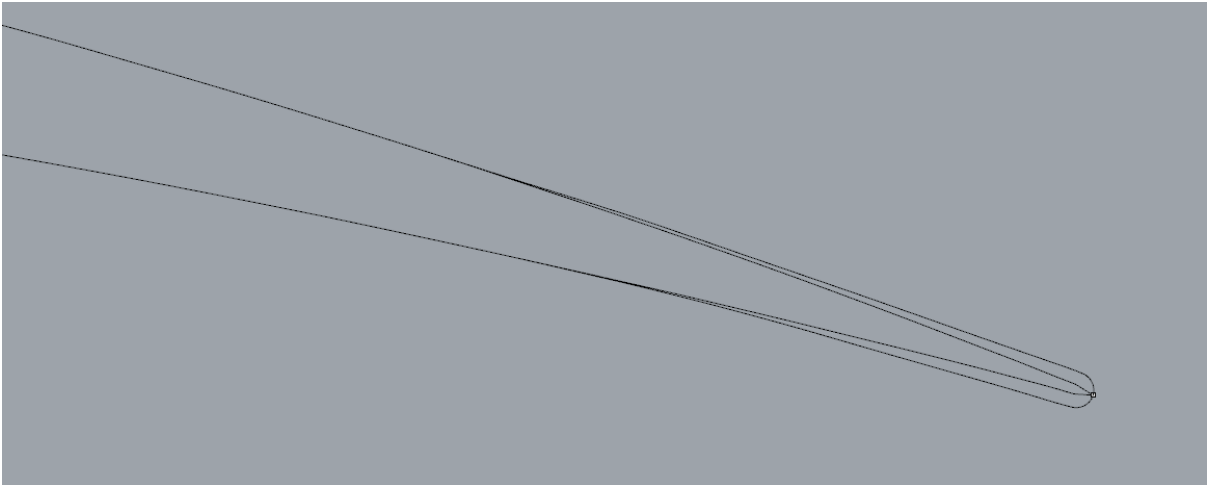
Vygenerované řezy listu musely být z důvodu technologického procesu výroby vrtule ještě mírně upraveny. Konkrétně se jedná o tvar odtokové hrany, který nelze vyrobit dokonale ostrý, ale musí zde být, z důvodu tloušťky jednotlivých vrstev kompozitního materiálu, vytvořen rádius. Tyto profily byly následně spojeny, aby vytvořily plášť listu, který byl připojen k vytvořenému středu listu.



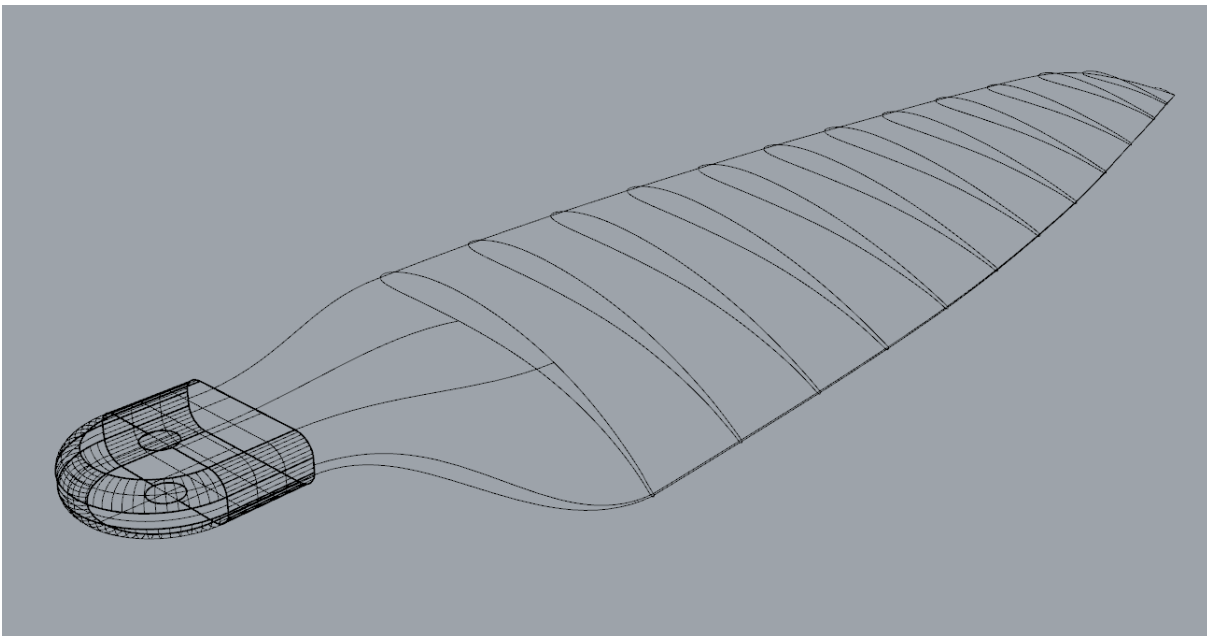
Obrázek 33 Jednotlivé řezy listu



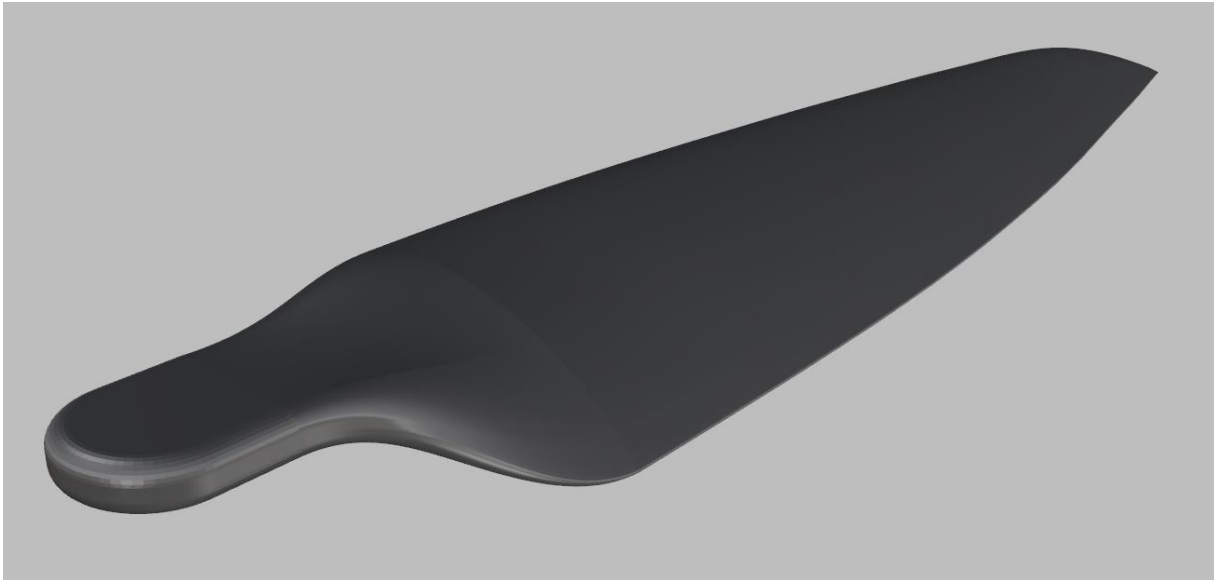
Obrázek 34 Upravený profil



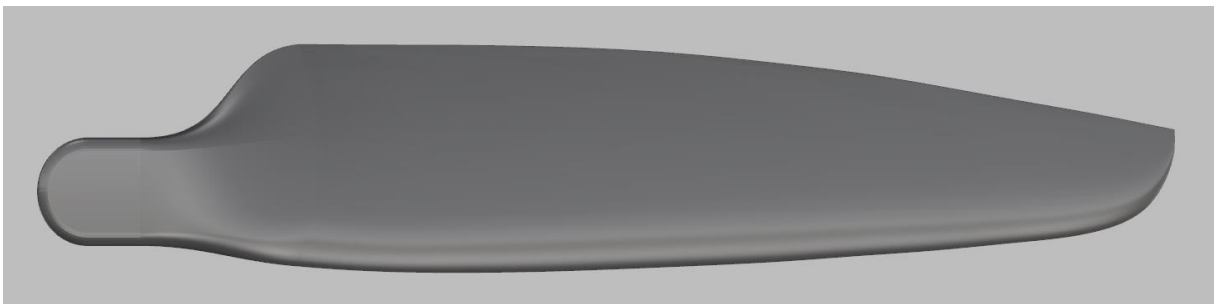
Obrázek 35 Detail upravené odtokové hrany



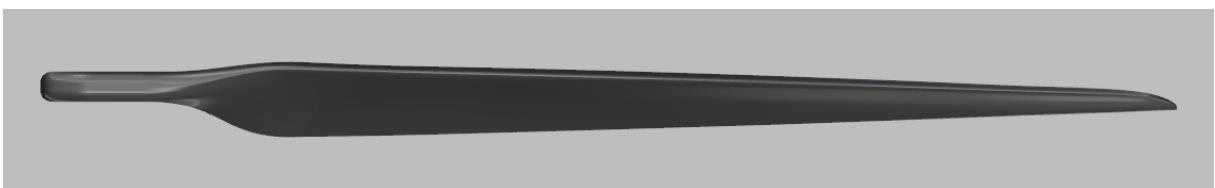
Obrázek 36 Kontury listu



Obrázek 37 Finální model listu

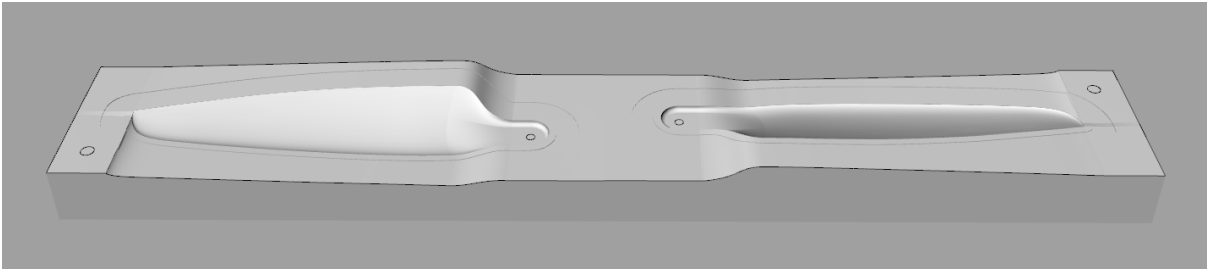


Obrázek 38 List – pohled shora

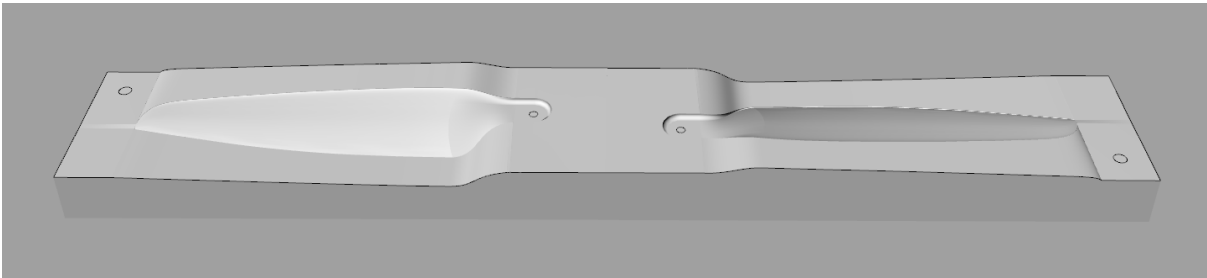


Obrázek 39 List – pohled zepředu

Po vytvoření 3D modelu listu vrtule je nutné vytvořit model formy, do které budou jednotlivé vrstvy vrtule vkládány. Formy jsou frézovány do umělého dřeva. Nejprve je proveden hrubovací proces, při kterém je odebrána většina materiálu, následuje dokončování, které zajišťuje nízkou drsnost povrchu. Proces je dokončen leštěním, které zajišťuje maximálně hladký povrch formy a následně i listu. Forma je doplněna o odtokovou drážku, která slouží k odvedení přebytečné epoxidové pryskyřice z kompozitního listu.



Obrázek 40 Forma listu – spodní



Obrázek 41 Forma listu – horní

7.4 VÝROBA LISTU VRTULE

Vyfrézovaná forma je před zahájením laminace vytřena separačním přípravkem, aby bylo finální vyjmutí listu co nejjednodušší a nedošlo k jeho porušení. Následně jsou do každé z forem vkládány jednotlivé vrstvy materiálu, které jsou spojovány epoxidovou pryskyřicí. Konkrétně se jedná o tyto vrstvy: skleněná tkanina 25g/m^2 , uhlíková tkanina 90g/m^2 a jednosměrná uhlíková vlákna 100g/m^2 , která jsou vyztužena uhlíkovým rovingem, který je v první třetině náběžné hrany a kolem středu listu. Formy jsou následně spojeny a stlačeny pomocí vzduchových vaků po dobu 12 hodin při tahu 3 bary a teplotě 55°C . Po vytvrnutí dochází k vyjmutí listu z formy a jeho dokončení. Dokončovací proces se skládá z odebrání přebytečné tkaniny na náběžné a odtokové hraně, vyvažování a leštění.

Pro tento experiment byly vyráběny dva typy vrtule, dutá vrtule (dále označována jako X) a vrtule s polyuretanovým jádrem (dále označována jako Y). Polyuretanové jádro je vyrobeno vstříkáním pěny do speciální formy a následně vloženo mezi obě poloviny listu. Toto jádro vytlačí přebytečnou pryskyřici z dutiny listu, takže list s polyuretanovým jádrem je přibližně o 20% lehčí než list dutý. Současně by měl být list s polyuretanovým jádrem tužší.

Následující obrázek zobrazuje první, neúspěšný pokus výroby dvou listů vrtule. Při vyjímání listů z formy nedošlo k dokonalému oddělení listu od povrchu formy a list byl zlomen. Důvodem špatné separace byla absorpce separačního prostředku materiálem formy.



Obrázek 42 První, neúspěšný pokus výroby listů vrtule

7.5 VYVAŽOVÁNÍ

Po dokončení výrobního procesu vrtule následuje jedna z nejdůležitějších operací – vyvažování. Jak již bylo zmíněno v teoretické části, existují dva druhy vyvažování, statické a dynamické. V tomto případě bylo použito pouze vyvažování statické.

U klasické vrtule postup vyvažování vypadá tak, že se vrtule uchytí pomocí středícího otvoru na ocelový kolík konkávního tvaru s ostrými hroty na obou koních tak, aby na něm pevně držela a neprotáčela se. Kolík je umístěn mezi dva silné magnety tak, že se jeden hrot dotýká magnetu, druhý hrot je pak v co nejkratší vzdálenosti k druhému magnetu, ale ke kontaktu nedochází (Obrázek 43). Tímto způsobem je zajištěno nejnížší možné tření, jelikož se systém vrtule – kolík dotýká vyvažovacího standu pouze na malém rádiu ostrého hrotu. Tím pádem se vrtule snadno vychýlí ze své polohy, v případě, že není správně vyvážená. Vyváženost vrtule se kontroluje ve dvou směrech, vertikálním a horizontálním. Pokud se vrtule alespoň z jedné z poloh vychýlí, musí dojít k jejímu dovyvážení. To probíhá dvěma způsoby podle složení jádra listu.

Jedná-li se o vrtuli s dutým listem, je vyvažování zajištěno přidáním zhuštěného epoxidu, který je nanášen injekční stříkačkou do dutiny listu předem navrtaným otvorem. Místo vyvrtání otvoru a objem potřebné epoxidové pryskyřice pracovník přibližně určí pomocí plastelíny, kterou zkouší lepit na povrch listu tak, aby vrtule setrvala v požadované poloze. Zhuštění epoxidu je provedeno přimícháním aerosilu a sekané bavlny ve správném poměru tak, aby byl epoxid dostatečně vazký. Jelikož k vytvrnutí epoxidu dochází během 30 – 60 minut, mohlo by se v případě přílišné tekutosti roztéci v dutině listu a způsobit tak další nevyvážení.

Jedná-li se o vrtuli s polyuretanovým jádrem uvnitř listu, je proces vyvažování obdobný. Po nalezení správného místa pro přidání hmoty, navrtá pracovník do listu malý otvor a speciálním přípravkem odebere část polyuretanového jádra. Do vzniklé dutiny následně vmáčkne několik olovených broků společně se zhuštěným epoxidem. Jelikož není prostor pro přidání hmoty příliš velký, používají se právě olovené broky, které mají vysokou hustotu, tedy více hmotnosti v menším objemu. Zhuštěný epoxid je použit z důvodu pevného přilepení broků k vnitřní straně listu, aby nedocházelo k jejich pohybu v rámci vzniklé dutiny.

Po vytvrnutí dochází k zahlázení děr a finálnímu leštění. Kontrola vyváženosti je poté prováděna ještě jednou, jiným pracovníkem, při naskladňování zhotovených vrtulí po konečné kontrole kvality. V případě, že je některá z kontrolovaných vrtulí stále nevyvážená, je vrácena zhotoviteli k dovyvážení.

U sklopných vrtulí je vyvažování poměrně komplikovanější. Pozice listů klasické jednokusé vrtule je totožná a neměnná, u vrtule sklopné tomu tak není. Další problém představují kovové komponenty, které spojují centrální unašeč s listy, jejichž magnetismus negativně ovlivňuje měření vyváženosti na magnetickém standu. Svou roli zde hraje i přibližně o 15% vyšší hmotnost celé sestavy, která vychyluje čep z vodorovné polohy.

V tomto případě bylo provedeno vyvažování sklopných vrtulí odděleně pro každý list. List vrtule byl uchycen do speciálního přípravku (Obrázek 44) tak, aby měl vždy totožnou polohu a za pomoci systému protivah byl vyvážen na magnetickém standu v horizontální a vertikální poloze. Následně byl list vyjmut a nahrazen dalším nevyváženým listem. Umístění protivah zůstalo neměnné, a tak byl nový list vyvážen v požadovaných polohách.



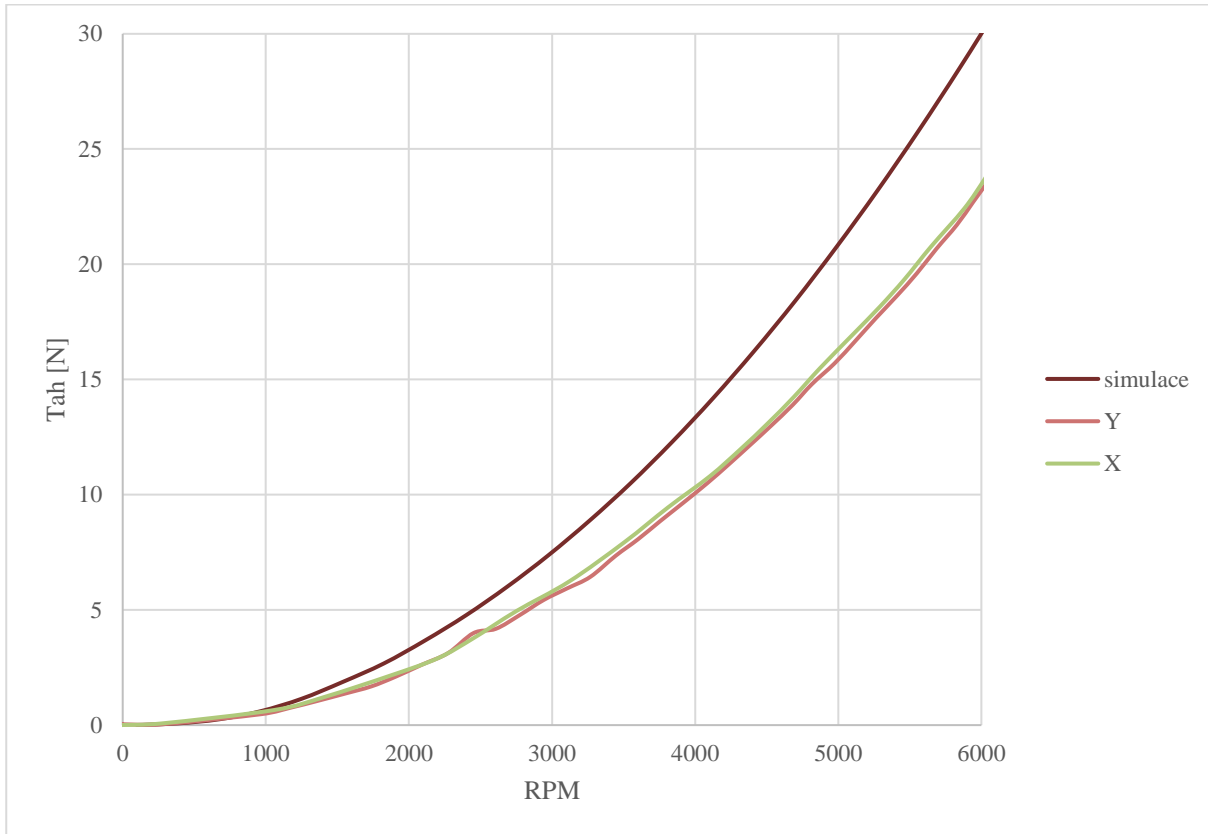
Obrázek 43 Detail vazby kolík – magnet



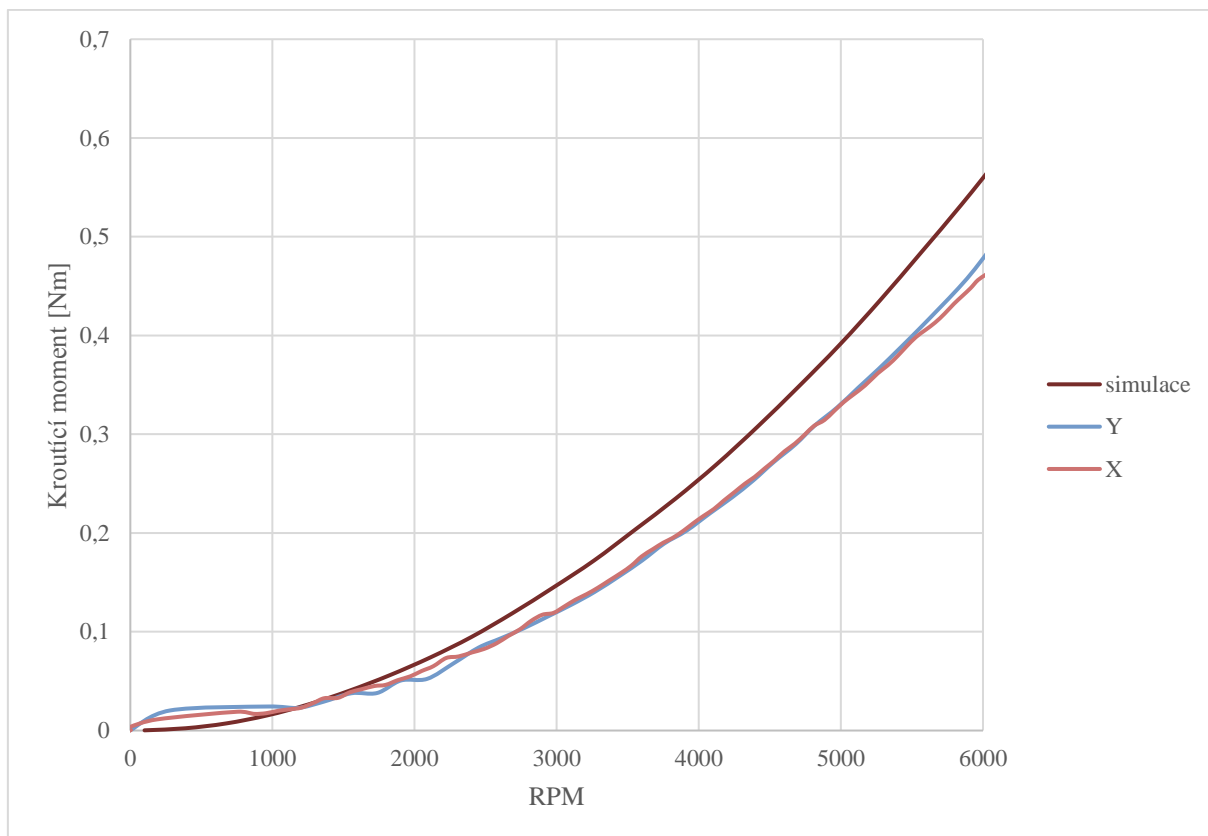
Obrázek 44 Přípravek pro vyvažování jednotlivých listů

7.6 ODCHYLKA SIMULACE

Následující grafy porovnávají predikované hodnoty tahu a kroutícího momentu v závislosti na otáčkách v porovnání s reálnými naměřenými hodnotami.



Graf 27 Porovnání simulace tahu s reálným testem vyrobených sklopných vrtulí X a Y

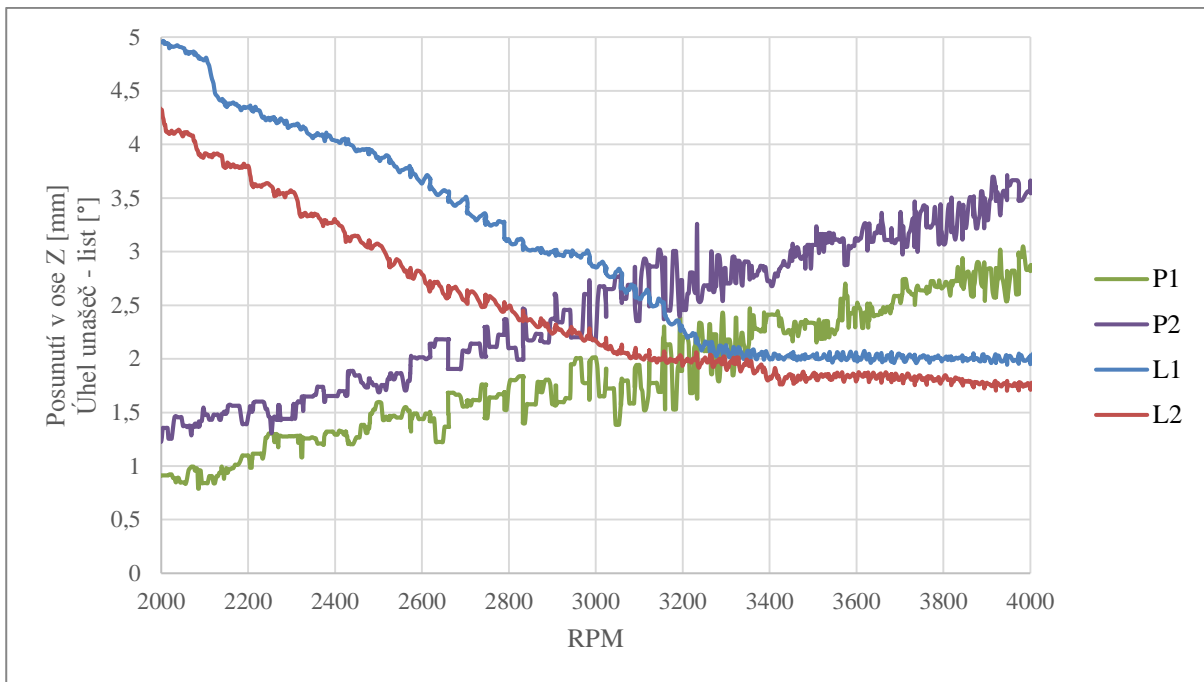


Graf 28 Porovnání simulace kroucího momentu s reálným testem vyrobených sklopných vrtulí X a Y

Reálné hodnoty tahu jsou o téměř 20% nižší než bylo predikováno simulací. Simulovaný kroucí moment je přibližně o 15% vyšší než jsou reálné naměřené hodnoty. Důvodem těchto, poměrně vysokých odchylek, jsou především nízká Reynoldsova čísla, pro které je obtížné určit reálné hodnoty součinitelů c_L a c_D . Další nepřesnosti mohou být způsobeny tvarovou odlišností virtuálního modelu listu a reálného vyrobeného listu. Na výsledky výkonů vrtule mají samozřejmě významný vliv i již zmíněné vibrace, změna tvaru listu, změna úhlu nastavení a pozice listu vůči centrálnímu unašeči při zatížení vrtule.

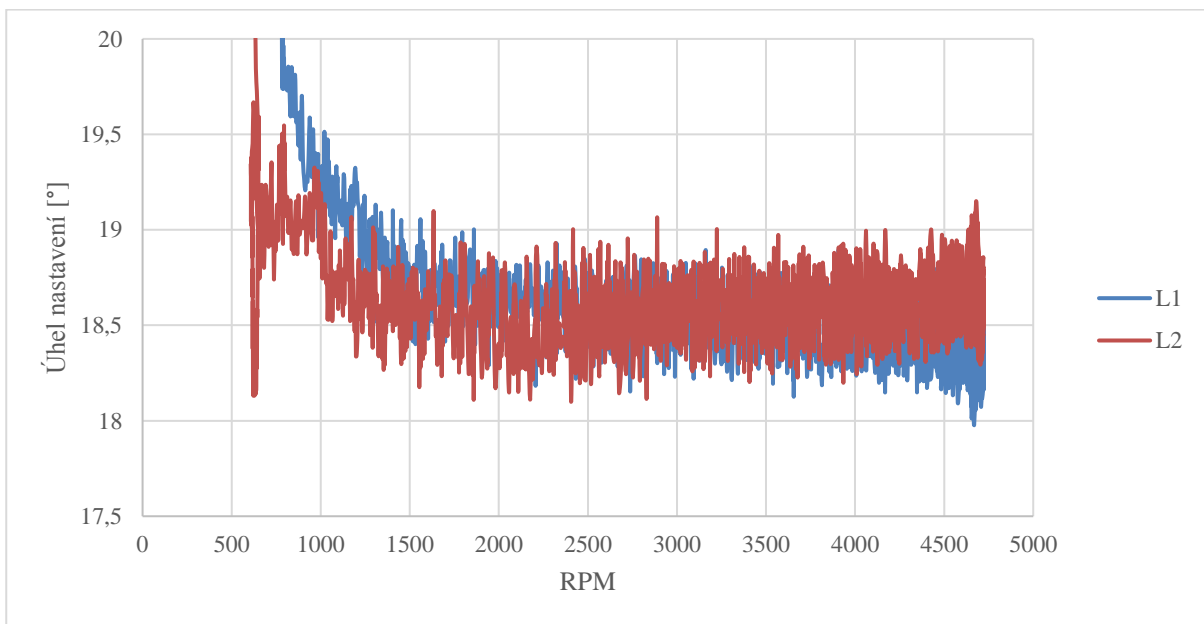
7.7 DYNAMICKÁ ANALÝZA

I u vlastního návrhu vrtule byla provedena analýza pohybu vrtule pomocí digitální korelace obrazu. Většina výsledků byla velice podobná jako při analýze v kapitole 6.2. Při otáčkách 3000RPM dochází u obou vrtulí (X a Y) k iniciaci vibrací a následné změně úhlů pootočení listů vůči centrálnímu unašeči. Odlišností je pouze výraznější pootočení obou listů vůči centrálnímu unašeči, zatímco u testovaných konkurenčních vrtulí byl výrazněji pootočen pouze jeden z listů (Graf 15).



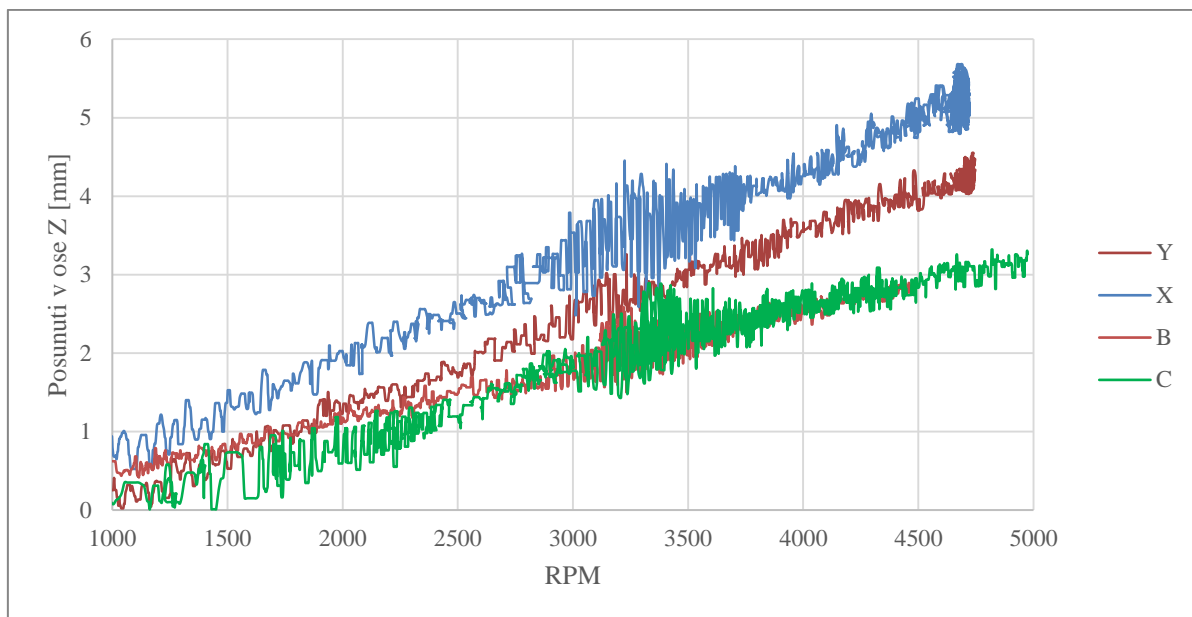
Graf 29 Kombinace posunutí a pootočení listu (vrtule X)

U obou testovaných vrtulí bylo také pozorováno kmitání úhlu nastavení listu kolem určité střední hodnoty, stejně jako u testovaných vrtulí A a B.



Graf 30 Změna úhlu nastavení listu 1 a listu 2 (vrtule X)

Jediným výraznějším rozdílem byly hodnoty posunutí konce listu v ose Z vrtulí X a Y v porovnání s testovanými konkurenčními vrtulemi. Zatímco u vrtulí B a C bylo maximální posunutí bodu v ose Z při otáčkách 4500RPM okolo 3mm u vlastního návrhu vrtule s polyuretanovým jádrem (Y) dosahovalo prohnutí 4mm, u duté vrtule (X) dokonce 5mm.

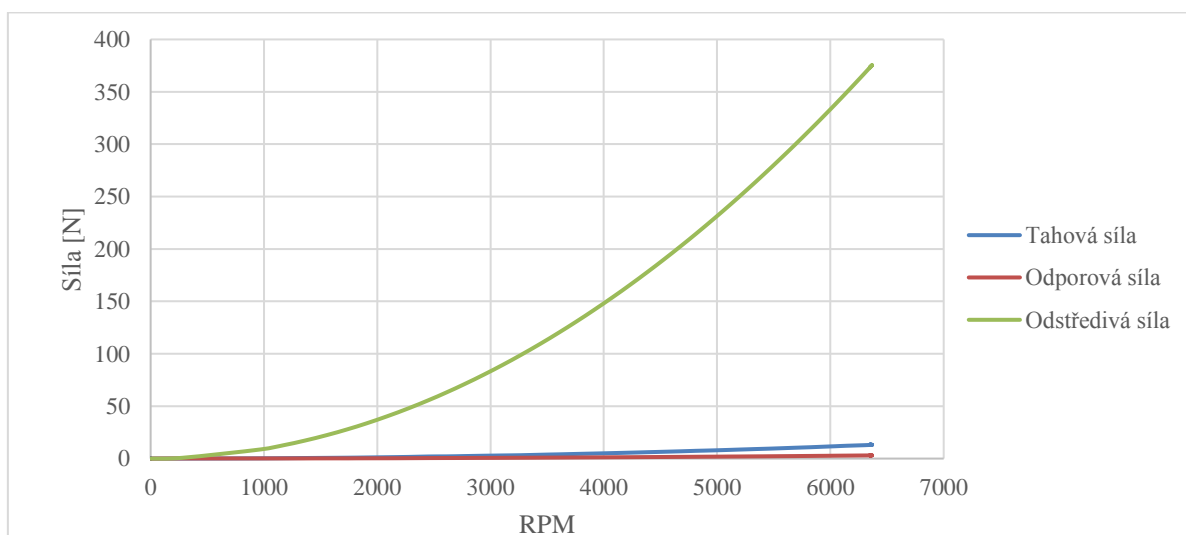


Graf 31 Porovnání posunutí konců listů v ose Z vybraných vrtulí

7.8 SILOVÉ ZATÍŽENÍ LISTU

Pro vlastní návrh vrtule bylo také spočítáno silové zatížení listu vrtule. Na list vrtule působí aerodynamické síly (tahová a odporová síla) a odstředivá síla. Pro zjednodušení byl list nahrazen hmotným bodem o hmotnosti listu a umístěn do odhadovaného těžiště listu. Hodnoty tahové síly působící na list vrtule byly určeny jednoduše z naměřeného tahu. Odporová síla byla dopočítána z naměřeného kroutícího momentu. A odstředivá síla byla dopočítána z následujícího vzorce:

$$F = mr\omega^2 \quad (64)$$

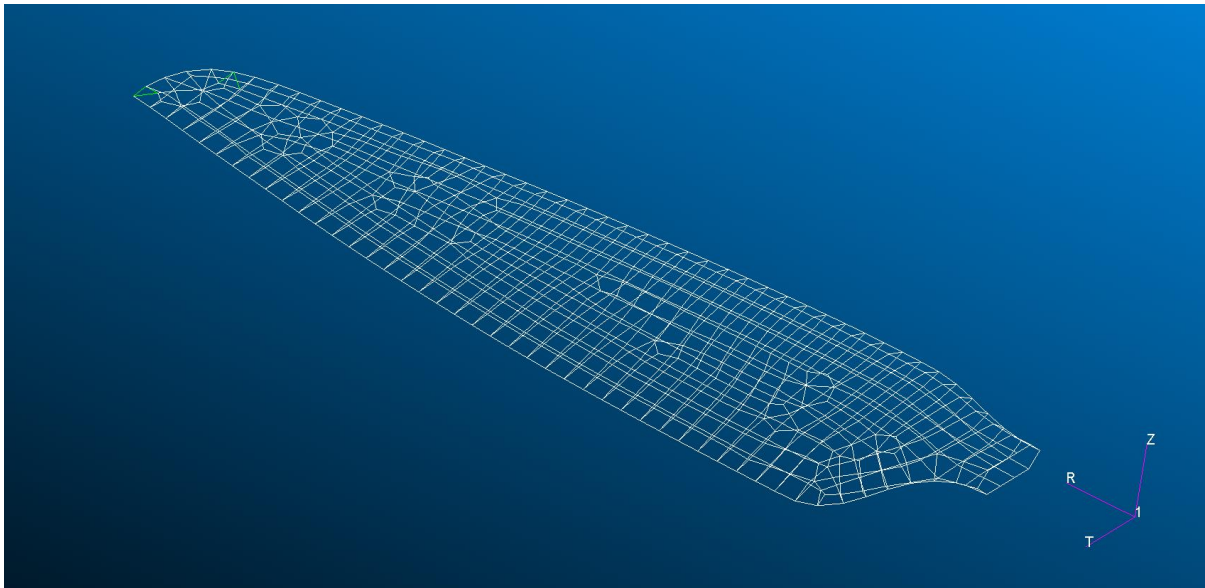


Graf 32 Porovnání sil působících na list vrtule

Z Grafu 32 je zřejmé, že aerodynamické síly působící na list vrtule jsou vůči odstředivé síle téměř zanedbatelné.

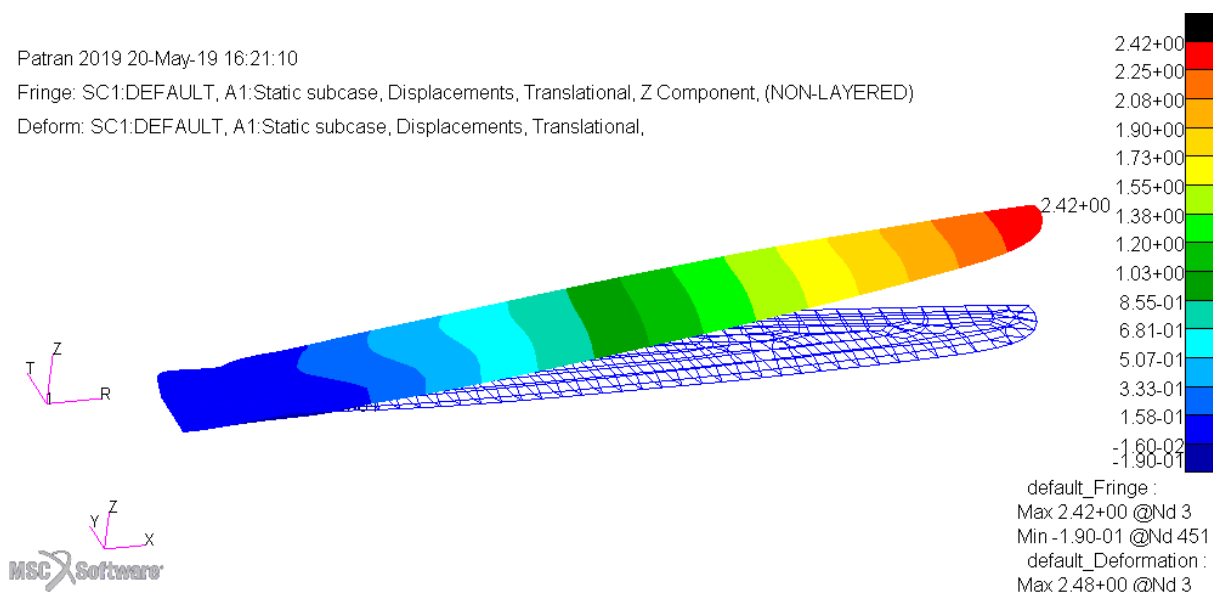
7.9 MODÁLNÍ ANALÝZA

Pro určení vlastní frekvence listu vrtule byla provedena modální analýza pomocí softwaru Patran a MSC Nastran. Prvním krokem bylo vytvoření sítě vrtule z 3D modelu listu. Následně byly definovány tuhostní charakteristiky jednotlivých vrstev kompozitní vrtule dle IDAFLIEG [13] a určeny tloušťky jednotlivých vrstev. Pro zjednodušení byl list ve svém kořeni vetknut.



Obrázek 45 Síťový model listu

Modální analýza byla nejprve provedena pro nezatížený list, hodnota první vlastní frekvence činila 93Hz. Následně byl list zatížen i odstředivou silou při otáčkách 3000RPM a výsledná první vlastní frekvence vzrostla na hodnotu 113Hz. Aerodynamické síly působící na list byly zanedbány.



Obrázek 46 Průhyb listu při jeho zatížení

Na Obrázku 46 je znázorněný průhyb listu při otáčkách 3000RPM. Hodnota simulovaného průhybu činí 2,42mm. Při reálném zatížení byl tento průhyb 2,2 až 2,7 mm. Což potvrzuje reálné tuhostí nastavení listu při simulaci.

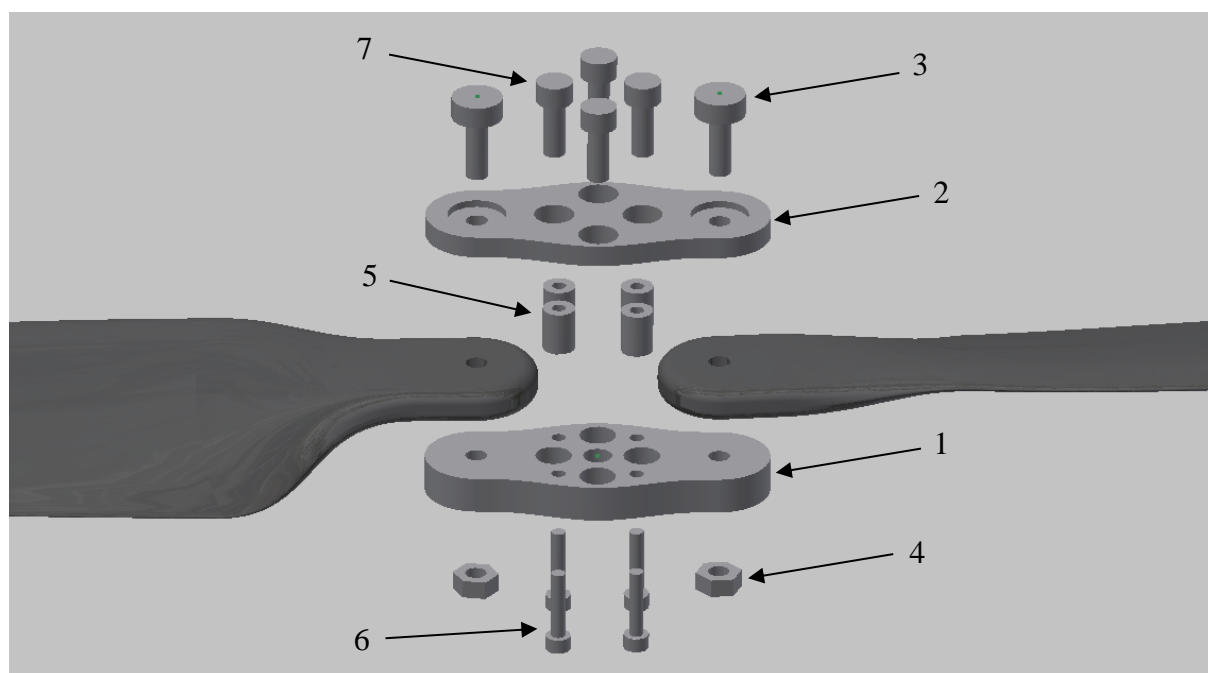
Přestože průhyb konce listu, určený pomocí modální analýzy, odpovídá jeho průhybu při reálném zatížení, první vlastní frekvence zatíženého listu je podle této analýzy 113Hz, což je hodnota dvakrát větší, než při které dochází k iniciaci vibrací, přibližně se jedná o frekvence v intervalu od 50 do 60Hz. Teorie zdroje vibrací příčinou vlastní frekvence vrtule tedy nebyla potvrzena. Provedení modální analýzy pro celou vrtuli je velice obtížné až nemožné, jelikož se obtížně definují tuhostní charakteristiky unašeče, a především pak spoje unašeč – list.

8 CENTRÁLNÍ UNAŠEČ

V následující kapitole bude představen vlastní návrh centrálního unašeče, který tvoří podstatnou část sklopné vrtule a může výrazně ovlivnit její výkonnostní parametry.

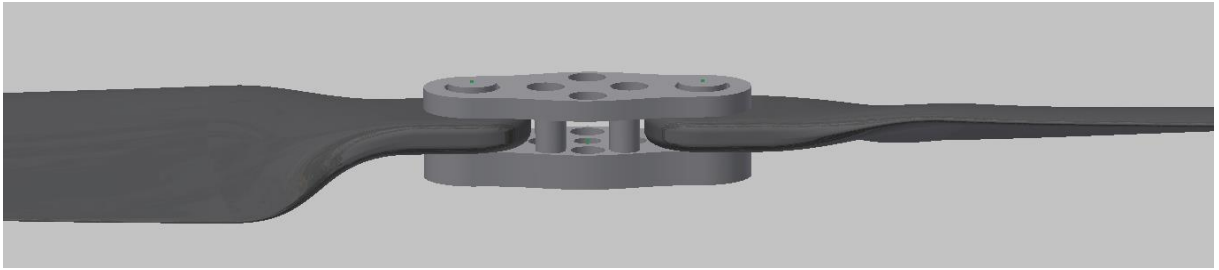
Vlastní návrh designu vychází z běžných konceptů unašečů sklopných vrtulí, které jsou tvořeny spodní a horní částí. Mezi tyto dvě části jsou vloženy kořeny listů vrtule, části jsou spojeny pomocí šroubového spoje, který současně tvoří osu rotace listu. Spodní část unašeče je následně pomocí centrovacího otvoru umístěna do správné polohy na motor a uchycena pomocí dvou nebo čtyř šroubů.

Navržený centrální unašeč je tedy tvořen spodní (1) a horní částí (2), mezi které jsou umístěny listy vrtule. Spojení obou částí je zajištěno šrouby s vnitřním šestihranem (3) a pojistnými maticemi (4), které jsou zapuštěny a přilepeny ve spodní části unašeče. Na rozdíl od běžných unašečů je tento návrh vybaven i čtyřmi gumovými kroužky (5). Použití těchto kroužků by mělo výrazně redukovat vibrace přenášené z listů vrtule na motor a následně na celé zařízení. Gumové kroužky jsou k unašeči instalovány pomocí čtyř šroubů s vnitřním šestihranem (6) ze spodní strany unašeče. Zkompletovaný unašeč je následně uchycen k motoru pomocí dvou nebo čtyř šroubů s vnitřním šestihranem (7).



Obrázek 47 Rozložení návrhu centrálního unašeče

Navrhovaným materiálem pro spodní a horní část unašeče je slitina hliníku 6061, která vyniká především vysokou pevností, dostatečnou tvrdostí a dobrou obrobiteľností. Pro tlumící kroužky je použita pryž. Spojovací materiál je normovaný dle DIN 912. Celková hmotnost centrálního unašeče činí 18g.



Obrázek 48 Návrh centrálního unašeče s tlumícími kroužky

9 METODICKÝ POSTUP NÁVRHU SKLOPNÉ VRTULE

Na základě teoretických poznatků, provedených analýz a měření byl vytvořen následující metodický postup návrhu sklopné vrtule daných rozměrů.

Hlavní požadavky na multikoptérové vrtule jsou především spolehlivost, skladnost, nízké vibrace a vysoká efektivita, která zaručí maximální délku letu zařízení. Efektivita vrtule je ovlivněna několika parametry.

Jedním z nich je tzv. zatížení disku, pro dosažení maximální efektivity by měla být tato hodnota co nejnižší, tedy maximální možná plocha disku a minimální možný tah generovaný vrtulí. V reálném světě dochází ke kompromisu mezi těmito dvěma veličinami, jelikož použití vrtulí s větším průměrem je většinou limitováno konstrukčními rozměry zařízení a generovaný tah musí být dostatečně velký, aby byl zajištěn bezpečný let.

Dalším důležitým aspektem je volba profilu použitého při návrhu listu. Jelikož vrtule podobných rozměrů a charakteristik operuje při nízkých Reynoldsových číslech, musí být vybíráno z profilů vhodných právě pro tuto oblast. Vybraný profil by měl mít nejvyšší poměr součinitelů vztlaku a odporu, tedy c_L/c_D . Pro určení vhodného úhlu nastavení zvolených profilů po délce listu je možné použít matematický model Mecaflux Heliciel. Odchylka predikovaných parametrů je však u sklopných vrtulí těchto menších rozměrů okolo 15 až 20%. Příčiny vzniku odchylek jsou popsány v kapitole 7.6.

Na efektivitu vrtule má samozřejmě významný vliv i změna tvaru listu při zatížení, zejména zkroucení listu. Deformace listu by měla být co nejmenší, tak aby list maximálně reprezentoval původní tvarový návrh. Vyšší tuhost listu vrtule může být zajištěna přidáním vhodné vrstvy uhlíkové tkaniny. Podstatný vliv na nastavení listu vrtule při zatížení, popřípadě celkovou deformaci vrtule, má i centrální unašeč. Důležité je především řešení a přesnost spojení centrálního unašeče s listem vrtule a vlastní tuhost unašeče.

Při návrhu vrtule by také mělo být maximální snahou redukovat veškeré vibrace a kmitání, které mají negativní vliv na efektivitu vrtule, jelikož zvyšují potřebu dodaného mechanického výkonu. Vibrace mohou mít negativní vliv i na samotnou multikopteru, popřípadě nesené zařízení. Kmitání listu ve směru osy vrtule by mělo být redukováno, již zmíněným, zvýšením tuhosti listu a celé soustavy vrtule. Třepotání listu vrtule podél osy listu je možno eliminovat vhodnou polohou těžiště, aerodynamické a elastické osy v jednotlivých řezech listu. Celkové vibrace vrtule přenášené na motor by měly být redukovány navrhovaným centrálním unašečem, který je vybaven tlumícími gumovými kroužky.

ZÁVĚR

Diplomová práce pojednává o problematice malých sklopných vrtulí pro bezpilotní prostředky. Práce je rozdělena do tří hlavních částí.

Úvodní část je věnována teoretickým poznatkům, které popisují obecnou základní teorii vrtule. V první části jsou také popsány aerodynamické metody pro návrh tvaru listů vrtulí, tyto postupy jsou následně použity při vlastním návrhu vrtule. Pozornost je věnována i proudění vzduchu při visu, který tvoří největší část letového profilu multikoptéry a zatížení vrtulového disku. Další kapitola této části pojednává o dynamickém zatížení vrtule. V kapitole je popsáno působení aerodynamických a odstředivých sil na list vrtule. Poslední kapitola této části je věnována teorii vyvažování vrtulí.

Druhá část práce je zaměřená na podrobnou analýzu již vyrobených sklopných vrtulí. Celkově bylo pořízeno šest různých sklopných vrtulí, které byly následně důkladně otestovány. U vrtulí byly měřeny základní parametry jako hmotnost a základní rozměry. Následně byla provedena jejich výkonnostní analýza, která porovnávala efektivnost jednotlivých vrtulí. Součástí analýzy byly i průběhy vibrací. Právě vibrace představují jeden z nejzávažnějších problémů sklopných vrtulí. Pro detailnější porozumění příčin vibrací byla provedena analýza pohybu vrtule pomocí digitální korelace obrazů – systém GOM Aramis. Analýza mapovala posunutí bodů umístěných na zvolených místech vrtule při rozběhu vrtule z 0 na 4500 RPM. Dále bylo měřeno pootočení listu vůči centrálnímu unašeči a změna úhlu nastavení listu v jeho maximální šířce. Výsledky analýzy odhalily zajímavé závislosti mezi vibracemi listu a jeho pootočení vůči centrálnímu unašeči, které jsou charakteristické pro všechny testované vrtule. Při určitých otáčkách vrtule dochází k výraznějším vibracím na koncích listů a zároveň ke zmenšení rozdílu úhlů pootočení mezi oběma listy vrtule. Možných příčin způsobující vibrace je několik. Prvotně byly vibrace připisovány vlastní frekvenci měřicího standu, jelikož ale bylo měření vibrací prováděno na dvou různých zařízeních a průběh vibrací byl stejný, je tato varianta odmítnuta. Tuto teorii vyvrací i samotný způsob měření posunutí krajních bodů listů vrtule, jelikož bylo měřeno vůči poloze bodu na středu centrálního unašeče. Vibrace nejsou způsobeny ani oscilující změnou úhlu nastavení listu, protože průběh tohoto kmitání je v závislosti na otáčkách konstantní. Dalším uvažovaným zdrojem byla vlastní frekvence soustavy vrtule, o které bude pojednáno níže v textu.

Třetí část díla popisuje návrh a výrobu listu profilu. Pro samotný návrh tvaru listu byl použit matematický model Mecaflux Heliciel, jehož funkčnost byla verifikována na již modelovaných a vyrobených vrtulích. Na základě zvoleného profilu, pracovních otáček a dalších parametrech byla provedena simulace výkonových charakteristik listu vrtule, která byla optimalizována pro maximální možnou účinnost. Z vygenerovaných profilů byl vymodelován list a následně i forma pro výrobu listu. Forma byla vyfrézována do umělého dřeva a nakonec vyleštěna, aby měl povrch vyráběného listu co nejnižší drsnost. Do formy byly ručně vkládány jednotlivé vrstvy materiálu, jedná se o skleněnou tkaninu, uhlíkovou tkaninu a jednosměrná uhlíková vlákna, které byly spojeny epoxidovou pryskyřicí. Po dokončení výroby listu dochází k jeho vyvažování. Následně byla navržená vrtule otestována a porovnána s predikovanými výkonnostními charakteristikami. Hodnoty naměřeného tahu byly nižší přibližně o 20%, stejně jako hodnoty kroutícího momentu, které se lišily o 15%. Příčinou těchto relativně vysokých odchylek je především oblast nízkých Reynoldsových čísel, pro které je obtížné určit reálné hodnoty součinitelů vztlaku a odporu. Odchylna je také ovlivněna tvaro-

vou odlišností module a reálného vyrobeného listu. Výkonnostní charakteristiky jsou významně ovlivněny i změnou tvaru listu při jeho zatížení, pootočením listu vůči centrálnímu unašeči a vibracemi. Vrtule byla také testována pomocí systému GOM Aramis. Analýza ukázala totožné výsledky vibrací a pootočení listů vůči unašeči jako u konkurenčních vrtulí. Jediným rozdílem byla nižší tuhost listu, které vedla k výraznějšímu posunutí jeho koncových bodů. Pro určení vlastní frekvence listu byla provedena modální analýza listu, která simulovala jeho materiálovou strukturu a zatížení. Simulovaný průhyb byl velice podobný reálnému průhybu, vlastní frekvence listu však byla výrazně vyšší, než bylo očekáváno (113Hz). Teorie vlastní frekvence vrtule jako zdroje zmíněných vibrací tedy nebyla potvrzena. Součástí návrhu vrtule byl i návrh centrálního unašeče, který vychází z konceptu používaných unašečů pro sklopné vrtule. Vytvořený design je však navíc doplněn o gumové tlumící kroužky, které by měly výrazně redukovat přenos vibrací.

Závěr práce je věnován stručnému metodickému postupu, který by měl posloužit při dalším návrhu sklopných vrtulí.

Během práce se podařilo zanalyzovat výkonnostní charakteristiky již existujících vrtulí a vytvořit vlastní návrh vrtule, který je výkonnostně srovnatelný s konkurenčními vrtulemi. Provedená měření odhalila zajímavé jevy, které jsou vhodné pro detailnější analýzu a další studium.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ALEXANDROV, V.L. *Letécké vrtule*. Praha: Statní Nakladatelství Technické Literatury, 1954.
- [2] *Propeller Theories* [online]. , 15 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/47810851/Ship-Hydrodynamics-Lecture-Notes-Part-5-Propeller-Theories4>
- [3] Blade Element Theory for Propellers. *Aerodynamics for Students* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.aerodynamics4students.com/propulsion/blade-element-propeller-theory.php>
- [4] *Principles of Helicopter Aerodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. ISBN 978-0521858601.
- [5] Propeller Balancing. *Flight Mechanic* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.flight-mechanic.com/propeller-balancing/>
- [6] Positions of two-bladed propeller during a balance check. In: *Flight Mechanic* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.flight-mechanic.com/propeller-balancing/>
- [7] Processing of Propeller Geometry. MH-Aerotoools [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.mh-aerotoools.de/airfoils/software.htm>
- [8] Series 1580/1585 Thrust Stand and Dynamometer. In: *RC Benchmark* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.rcbenchmark.com/pages/series-1580-thrust-stand-dynamometer>
- [9] Series 1585 Dynamometer Datasheet. *RC Benchmark* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://cdn-docs.rcbenchmark.com/datasheets/series-1585/Datasheet-RCbenchmark-Series-1585.pdf>
- [10] Measurement Principles of (DIC). Dantec Dynamics [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-dic>
- [11] Digital Image Correlation and Strain Computation Basics. *GOM* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.gom.com/fileadmin/user_upload/systems/GOM_Technical-White-Paper_DIC_EN.pdf
- [12] *Airfoil Tools: Airfoil database search* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://airfoiltools.com/search/index>
- [13] Dimensionierungsrichtwerte für den Segel- und Motorsegelflugzeugbau. Stuttgart: IDAFLIEG, 1988.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	[m ²]	Plocha disku
b	[m]	Šířka listu
c_D	[-]	Součinitel odporu
c_L	[-]	Součinitel vztlaku
c_Q	[-]	Součinitel kroucího momentu
c_T	[-]	Součinitel tahu
D	[m]	Průměr vrtule
f	[Hz]	Frekvence
F	[N]	Síla
I	[A]	Elektrický proud
I	[kg.m ²]	Moment setrvačnosti
J	[-]	Rychlostní poměr
L	[m ²]	Plošná plnost
$L1$		Vrtulový list 1
$L2$		Vrtulový list 2
m	[kg]	Hmotnost
M	[Nm]	Kroucí moment
n	[s ⁻¹]	Otáčky
P	[W]	Výkon
p	[Pa]	Tlak
$P1$		Bod na konci listu 1
$P2$		Bod na konci listu 2
Q	[m ³ /s]	Objemový průtok
r	[m]	Poloměr
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
RPM	[min ⁻¹]	Otáčky za minutu
S	[m ²]	Plocha
T	[kg]	Tah
t	[m]	Tloušťka listu
U	[V]	Napětí

u	[m/s]	Přírůstek rychlosti
UAV		Bezpilotní letoun
v	[m/s]	Rychlost
$VTOL$		Vertikální vzlet a přistání
x,y	[m]	Souřadnice
α	[°]	Úhel náběhu
η	[-]	Účinnost
ρ	[kg/m ³]	Hustota
σ	[Pa]	Napětí
φ	[°]	Úhel nastavení
ω	[rad ⁻¹]	Úhlová rychlost

SZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Vznik profilu listu [1].....	17
Obrázek 2 Lineární průběh obvodové rychlosti podél vrtulového listu [1]	17
Obrázek 3 Rychlostní trojúhelník řezu listu [1].....	18
Obrázek 4 Změny rychlostního trojúhelníku řezu listu při změně vrtulového režimu [1]	19
Obrázek 5 Geometrická charakteristika listu [1]	21
Obrázek 6 Stoupání vrtule [1].....	22
Obrázek 8 Propulsní systém [2].....	26
Obrázek 9 Vybraná část listu vrtule – pohled shora [3].....	30
Obrázek 10 Silová analýza vybrané části listu vrtule [3].....	30
Obrázek 11 Rychlostní pole v blízkosti dvoulisté vrtule při visu [4].....	32
Obrázek 12 Závislost efektivity vrtule na zatížení disku vrtule [4]	33
Obrázek 13 Působíště vztlaku profilu [1]	34
Obrázek 14 Rozklad odstředivé síly elementu listu na podélnou a příčnou složku [1]	34
Obrázek 15 Průběh sil, dávajících v průřezu listu dvojici, jež se snaží pootočit list na menší úhel nastavení [1]	35
Obrázek 16 Odlehčení listu od ohybového momentu tahu vrtule účinkem ohybového momentu odstředivé síly [1]	35
Obrázek 17 Zmenšení kroucení zkroucené desky působením síly rovnoběžné s osou zkroucení [1].....	36
Obrázek 18 Průběh velikosti odstředivé síly podél listu [1]	37
Obrázek 19 Průběh ohybového momentu podél listu [1].....	37
Obrázek 21 Testované vrtule – pohled zepředu.....	41
Obrázek 22 Testované vrtule – pohled shora.....	42
Obrázek 23 Měřicí stand RC Benchmark 1585 Series [8].....	45
Obrázek 24 Schéma stereoskopického senzoru [11].....	53
Obrázek 28 Profil A18 [12]	64
Obrázek 29 Profil BE50 [12].....	64
Obrázek 30 Profil GM15 [12].....	64
Obrázek 31 Profil MA409 [12].....	64
Obrázek 32 Profil NACA 6409 [12].....	64
Obrázek 33 Jednotlivé řezy listu.....	67
Obrázek 34 Upravený profil	67
Obrázek 35 Detail upravené odtokové hrany.....	68
Obrázek 36 Kontury listu.....	68
Obrázek 37 Finální model listu.....	69
Obrázek 38 List – pohled shora	69
Obrázek 39 List – pohled zepředu	69
Obrázek 40 Forma listu – spodní.....	70
Obrázek 41 Forma listu – horní	70
Obrázek 43 Detail vazby kolík – magnet.....	73

Obrázek 44 Přípravek pro vyvažování jednotlivých listů.....	73
Obrázek 45 Síťový model listu.....	78
Obrázek 46 Průhyb listu při jeho zatížení.....	78
Obrázek 47 Rozložení návrhu centrálního unašeče	80
Obrázek 48 Návrh centrálního unašeče s tlumícími kroužky	81

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Průměr vrtule	43
Tabulka 2 Hmotnosti jednotlivých komponentů vrtule	43
Tabulka 3 Specifikace měřicího standu RC Benchmark 1585 Series [9]	45

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Celková hmotnost vrtule	43
Graf 2 Rozložení šířky listu	44
Graf 3 Úhel nastavení listu	44
Graf 4 Tah testovaných vrtulí	46
Graf 5 Kroutící moment testovaných vrtulí	46
Graf 6 Vibrace testovaných vrtulí	47
Graf 7 Mechanický výkon testovaných vrtulí	48
Graf 8 Efektivita testovaných vrtulí	49
Graf 9 Efektivita testovaných vrtulí (interval tahu 5 - 15N).....	49
Graf 10 Efektivita testovaných vrtulí (interval tahu 15 – 25N).....	50
Graf 11 Elektrický výkon testovaných vrtulí.....	50
Graf 12 Závislost pootočení listu 1 a listu 2 vůči unašeči (vrtule B).....	56
Graf 13 Posunutí bodů na koncích listů (vrtule B)	56
Graf 14 Kombinace posunutí a pootočení listu (vrtule B).....	57
Graf 15 Kombinace posunutí a pootočení listu (vrtule C).....	57
Graf 16 Oblast iniciace vibrací u vybraných vrtulí.....	58
Graf 18 Změna úhlu nastavení listu 1 a listu 2 (vrtule C).....	59
Graf 19 Změna úhlu nastavení při ustálených otáčkách (vrtule B)	60
Graf 20 Změna úhlu nastavení při ustálených otáčkách (vrtule C)	60
Graf 21 Porovnání simulace tahu s reálným testem	62
Graf 22 Porovnání simulace kroutícího momentu s reálným testem	63
Graf 23 Závislost Re na otáčkách a vzdálenosti od středu rotace.....	63
Graf 24 Poměr c_l/c_d vybraných profilů při Re 50 000	65
Graf 25 Poměr c_l/c_d vybraných profilů při Re 100 000	65
Graf 26 Poměr c_l/c_d vybraných profilů při Re 200 000	66
Graf 27 Porovnání simulace tahu s reálným testem vyrobených sklopných vrtulí X a Y	74
Graf 28 Porovnání simulace kroutícího momentu s reálným testem vyrobených sklopných vrtulí X a Y	75
Graf 29 Kombinace posunutí a pootočení listu (vrtule X).....	76
Graf 30 Změna úhlu nastavení listu 1 a listu 2 (vrtule X)	76
Graf 31 Porovnání posunutí konců listů v ose Z vybraných vrtulí	77
Graf 32 Porovnání sil působících na list vrtule	77

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Analyzovaná vrtule A.....	93
Příloha 2 Analyzovaná vrtule B.....	93
Příloha 3 Analyzovaná vrtule C.....	93
Příloha 4 Analyzovaná vrtule D.....	94
Příloha 5 Analyzovaná vrtule E.....	94
Příloha 6 Analyzovaná vrtule F.....	94

PŘÍLOHY

Ⓐ



Ⓐ



Příloha 1 Analyzovaná vrtule A

Ⓑ



Ⓑ



Příloha 2 Analyzovaná vrtule B

Ⓒ



Ⓒ



Příloha 3 Analyzovaná vrtule C

Ⓓ



Ⓓ



Příloha 4 Analyzovaná vrtule D

Ⓔ



Ⓔ



Příloha 5 Analyzovaná vrtule E

Ⓕ



Ⓕ



Příloha 6 Analyzovaná vrtule F