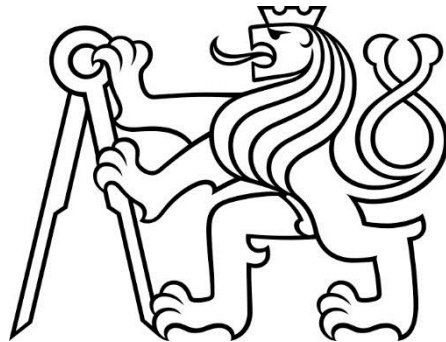


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav letadlové techniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh náboje sklopné stavitelné vrtule

*Hub design for folding and adjustable propeller*

Vedoucí práce: Ing. Karel Barák

Vypracoval: Pavel Baránek

Praha 2019

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Baránek** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **419938**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**  
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**  
Studijní obor: **Letadlová a kosmická technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Návrh náboje sklopné stavitelné vrtule**

Název diplomové práce anglicky:

**Hub design for folding and adjustable propeller**

Pokyny pro vypracování:

Konstrukční návrh náboje sklopné a zároveň stavitelné vrtule pro elektromotor o výkonu do 25 kW.

Pro vypracování proveďte:

- 1) Rešerše současného stavu sklopných a stavitelných vrtulí.
- 2) Stanovení zatížení vrtulového náboje.
- 3) Konstrukce vrtulového náboje.
- 4) Pevnostní kontrolu navrženého náboje.

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

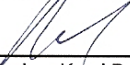
**Ing. Karel Barák, ústav letadlové techniky FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

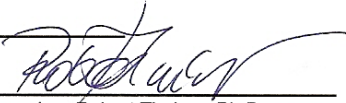
Datum zadání diplomové práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **02.08.2019**

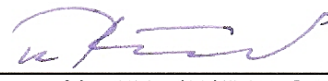
Platnost zadání diplomové práce:



Ing. Karel Barák  
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Robert Theiner, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

30.4.2019  
Datum převzetí zadání

Podpisek  
Podpis studenta

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze citované zdroje a literaturu.

Nemám žádných námitek proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

Podpis .....

# Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Karlu Barákovi za cenné rady, připomínky a trpělivost. Dále bych rád vyjádřil díky Ing. Janu Klesovi za rady z oblasti zatížení vrtulí a mé rodině za neochvějnou podporu.

# Anotace

BARÁNEK, P.: Návrh náboje sklopné stavitelné vrtule: diplomová práce. Praha: ČVUT- České vysoké učení technické, Fakulta strojní, Ústav letadlové techniky, 2019, Vedoucí práce: Barák, K.

Cílem této práce je konstrukční návrh náboje sklopné stavitelné vrtule a jeho pevnostní kontrola. K tomu účelu je v úvodní části vypracována rešerše stávajících systémů. Další část se zabývá stanovením zatížení vrtulového náboje od listů vrtule. Následuje konstrukční návrh. Pevnostní kontrola prvků navrženého náboje je prováděna průběžně při návrhu.

Klíčová slova: vrtule, sklopná vrtule, stavitelná vrtule, unašeč, náboj vrtule, zatížení náboje, zatížení vrtule

# Abstract

BARÁNEK, P.: Hub design for folding and adjustable propeller: master thesis. Prague: CTU – Czech Technical University, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Aerospace Engineering, 2019, Supervisor: Barák, K.

This thesis deals with hub design for folding and adjustable propeller. In the first part of this thesis, the overview of systems and principles was made. Second part is focused on propeller hub loads analysis. This work is completed by the hub design and strength analysis.

Key words: folding propeller, adjustable propeller, propeller loads, propeller hub

# Seznam obrázků

Obr. 1 Porovnání účinnosti různých typů vrtulí [1] .....	15
Obr. 2 Sklopná vrtule pro model letadla [4] .....	16
Obr. 3 Tlačná vrtule na kluzáku [5] .....	17
Obr. 4 Fixace listů pomocí torzních pružin [6].....	17
Obr. 5 Sklápění listů pomocí zkrutných pružin [7].....	18
Obr. 6 Sklopná vrtule s tlačnou pružinou pro UAV [8].....	18
Obr. 7 Natáčení listu pákovým převodem [9].....	19
Obr. 8 Převod kuželovým soukolím [9].....	20
Obr. 9 Schéma hydraulického převodu [9] .....	21
Obr. 10-Průřez systémem Hamilton Standart Hydromatic propeller [10] .....	22
Obr. 11 Schéma systému Hamilton Standart Hydromatic Propeller [11].....	23
Obr. 12 Páka ovládání mechanické vrtule značky Kaspar [12] .....	24
Obr. 13 Stavěcí mechanismus společnosti Woodcomp [13].....	25
Obr. 14 Vrtule systému Ivoprop [14].....	25
Obr. 15 Curtiss Electric propeller [11].....	26
Obr. 16 Schéma elektromotoru [16] .....	28
Obr. 17 Hnací elektromotor [16].....	28
Obr. 18 Orientační hodnoty rozsahu úhlů nastavení listů pro vrtule stálých rychlostí [17].....	29
Obr. 19 Síly a momenty působící na vrtuli [9].....	30
Obr. 20 List vrtule navržený v [18].....	30
Obr. 21 Znaménka momentů k řezu listu [9] .....	32
Obr. 22 Zatížení působící na náboj vrtule [20] .....	34
Obr. 23 Průběh odstředivé síly.....	36
Obr. 24 Rychlostní trojúhelník na řezu [9] .....	37
Obr. 25 Vztlková síla působící na řez [9].....	38
Obr. 26 Průběh momentu aerodynamických sil po poloměru .....	39
Obr. 27 Aerodynamické síly na profilu [9].....	40
Obr. 28 Průběh tahového ohybového momentu.....	41
Obr. 29 Rozložení odstředivých sil [9] .....	42
Obr. 30 Odstředivé síly na řezu [9].....	42
Obr. 31 Ohybové momenty na listu [9] .....	43

Obr. 32 Aproximace deskou [9].....	43
Obr. 33 Elementární hmota mezi řezy [9].....	44
Obr. 34 Působíště odstředivé síly [9].....	44
Obr. 35 Souřadná soustava [9].....	44
Obr. 36 Průběh $M\omega$ .....	48
Obr. 37 Kombinované ložisko SKF [22].....	54
Obr. 38 Transmotec PD3046-24-189-BFEC.....	57
Obr. 39 Transmotec PD3046-24-189-BFEC - rozměry.....	57
Obr. 40 Rozměry čepového spoje.....	58
Obr. 41 Lícovaný šroub.....	59
Obr. 42 Sklápěcí mechanismus.....	63
Obr. 43 Uložení listu třemi ložisky [9].....	64
Obr. 44 Kombinované jehlové a kuličkové ložisko [4].....	64
Obr. 45 Otočný čep.....	66
Obr. 46 Část náboje s přírubou.....	66
Obr. 47 Přední část.....	67
Obr. 48 Sběrná deska.....	68
Obr. 49 Elektrický obvod v náboji.....	69
Obr. 50 Zástavbové rozměry spínače [23].....	70
Obr. 51 Spínací mechanismus.....	70

## Seznam tabulek

Tab. 1 Geometrické parametry vrtule .....	33
Tab. 2 Odstředivá síla listu .....	36
Tab. 3 Hodnoty momentu od aerodynamických sil .....	39
Tab. 4 Hodnoty ohybového momentu.....	41
Tab. 5 Hodnoty průběhu $M\omega$ .....	49
Tab. 6 Dovolené hodnoty tlaku [21] .....	51
Tab. 7 Tabulkové hodnoty pohybového šroubu.....	51
Tab. 8 Parametry kombinovaného ložiska NX 10 .....	54
Tab. 9 Rozměry torzní pružiny .....	61
Tab. 10 Parametry ložiska NX40 .....	65

## Seznam příloh

1. Jehlová ložiska/axiální ložiska- NX10 Z – technický list
2. Jehlová ložiska/axiální ložiska- NKX 40 – technický list
3. Elektromotor PD3046 – technický list
4. Výkres sestavy
5. Kusovník



## Použité značení

$F_o$	[N]	Odstředivá síla listu
$\omega$	[rad/s]	Úhlová rychlost vrtule
$r$	[m]	Poloměr listu
$m$	[kg]	Hmotnost listu
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha
$n$	[1/min]	Otáčky vrtule
$k_3$	[-]	Koeficient profilu
$b$	[mm]	Hloubka listu
$t$	[mm]	Tloušťka listu
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota
$Ma$	[Nm]	Moment od aerodynamických sil
$Y$	[N]	Vztlaková síla profilu
$W_1$	[m/s]	Rychlost nabíhajícího vzduchu
$\tau$	[%]	Relativní tloušťka
$\alpha_1$	[°]	Návrhový úhel náběhu
$\theta_1$	[°]	Rychlostní úhel
$\phi$	[°]	Úhel nastavení
$U$	[m/s]	Obvodová rychlost
$Q$	[N]	Odporová síla
$x_{AC}$	[-]	Relativní poloha aerodynamického středu
$c_{m0}$	[-]	Součinitel klopivého momentu
$x_T$	[m]	Vzdálenost těžiště profilu od náběžné hrany
$M_o$	[Nm]	Ohybový moment
$cd$	[-]	Součinitel odporu
$cl$	[-]	Součinitel vztlaku
$T$	[N]	Tah vrtule
$M_\omega$	[Nm]	Moment od odstředivé síly
$x$	[-]	Horizontální souřadnice
$y$	[-]	Vertikální souřadnice
$I_{xy}$	[mm <sup>4</sup> ]	Deviační moment
$I_{min}$	[mm <sup>4</sup> ]	Minimální moment setrvačnosti
$I_{max}$	[mm <sup>4</sup> ]	Maximální moment setrvačnosti
$a1$	[-]	Součinitel profilu
$a2$	[-]	Součinitel profilu
$R$	[m]	Průměr vrtule
$p$	[MPa]	Střední tlak ve šroubu
$p_D$	[MPa]	Dovolený tlak
$d'2$	[mm]	Předběžný střední průměr šroubu
$\psi_H$	[-]	Součinitel pracovní výšky závitů
$\psi_h$	[-]	Součinitel pracovní výšky matice
$f$	[-]	Součinitel tření
$d$	[mm]	Vnější průměr závitů
$d_2$	[mm]	Střední průměr závitů

$d_3$	[mm]	Průměr jádra
$P$	[mm]	Rozteč závitu
$H_1$	[mm]	Pracovní průměr závitu
$S_3$	[mm]	Plocha jádra
$\mu$	[-]	Součinitel vlivu uložení
$L$	[mm]	Délka šroubu
$S_3$	[mm <sup>2</sup> ]	Plocha jádra
$\lambda$	[-]	Štíhlost
$\sigma_D$	[MPa]	Tlakové napětí v dříku šroubu
$\theta_n$	[°]	Úhel boku
$M_{kš}$	[Nm]	Krouticí moment šroubu
$W_{k3}$	[mm <sup>3</sup> ]	Průřezový modul v krutu
$\tau_3$	[MPa]	Smykové napětí v dříku
$\sigma_{red}$	[MPa]	Redukované napětí
$k$	[-]	Součinitel bezpečnosti
$n_{š}$	[1/min]	Otáčky šroubu
$vp$	[mm/s]	Rychlost posuvu
$P_{vyst}$	[W]	Výstupní výkon
$\eta_z$	[-]	Účinnost závitu
$\eta_{lv}$	[-]	Účinnost ložisek
$\eta_c$	[-]	Celková účinnost
$P'M$	[W]	Minimální výkon elektromotoru
$\sigma_o$	[MPa]	Ohybové napětí
$\sigma_{kt}$	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
$W_o$	[mm <sup>3</sup> ]	Modul pružnosti v ohybu
$\tau_D$	[MPa]	Dovolené napětí ve smyku
$p_1$	[MPa]	Tlak listu
$d$	[mm]	délka kořene listu
$b$	[mm]	Šířka kořene listu
$a$	[mm]	šířka úchytu
$p_2$	[MPa]	Tlak v otvoru pro čep

# Obsah

Použité značení .....	9
1 Úvod .....	13
2 Mechanismy a používané systémy .....	14
2.1 Historie stavitelných mechanismů vrtulí.....	14
2.2 Typy vrtulí.....	15
2.3 Sklápění listů.....	15
2.3.1 Modely a motorové kluzáky.....	16
2.3.2 Drony a UAV .....	18
2.4 Mechanismus nastavení úhlu listů .....	19
2.5 Hydraulická vrtule.....	21
2.5.1 Hamilton Standart Hydromatic Propeller.....	22
2.6 Mechanická vrtule.....	24
2.7 Elektricky stavitelné vrtule .....	24
2.7.1 Curtiss Electric Propeller .....	26
3 Pohonná jednotka .....	28
4 Požadavky na konstrukci .....	29
4.1 Předpisové požadavky.....	31
4.1.1 UL-2 .....	31
5 Zatížení náboje .....	32
5.1 Odstředivá síla $F_o$ .....	35
5.2 Krouticí moment od aerodynamických sil $M_a$ .....	37
5.3 Ohybový moment od tahové síly $M_o$ .....	40
5.4 Moment odstředivých sil $M_{\omega}$ .....	42
5.4.1 Odvození vzorce pro výpočet $M_{\omega}$ podle V. L. Alexandrova.....	44
6 Konstrukční návrh náboje.....	50
6.1 Návrh a kontrola pohybového šroubu .....	50

6.1.1	Pevnostní kontrola na tah a tlak .....	51
6.1.2	Kinematické poměry .....	55
6.2	Návrh uchycení listu .....	58
6.2.1	Návrh a kontrola na ohyb .....	58
6.2.2	Kontrola na smyk .....	59
6.2.3	Kontrola tlaku v listu .....	60
6.2.4	Kontrola tlaku v táhle .....	60
6.3	Návrh vratné pružiny listu.....	61
6.4	Uložení otočného čepu v náboji .....	64
6.5	Skříň náboje .....	66
6.5.1	Kontrola tlaku v závitech víka.....	67
6.6	Elektrická instalace .....	68
6.6.1	Sběrná deska.....	68
6.6.2	Jištění dorazů krajních poloh úhlu nastavení .....	69
7	Závěr.....	71
	Přílohy.....	74

# 1 Úvod

Tato práce se zabývá návrhem konstrukce unašeče dvoulisté tlačné vrtule pro motorový kluzák s elektromotorem o výkonu 25 kW. Zvláštností konstrukce je možnost sklápění listů po směru letu a změny úhlu nastavení listů během letu. Kromě snížení aerodynamického odporu při plachtění, tak umožňuje přestavováním listů hospodárnější využití výkonu elektromotoru pohánějícího letoun. S určitou mírou nadsázky se tedy dá mluvit o ekvivalentu převodovky u vozidel. Samotná kombinace sklápění s nastavováním listů je originální a autorovi dosud není znám žádný případ použití v praxi. Snahou je tedy, v souladu s nejmodernějšími trendy, co nejvíce přispět k maximálnímu využití energie z akumulátorů. A to i za cenu, jak je tomu v tomto případě, mírnému zvýšení hmotnosti náboje o polohovací mechanismus, elektromotor s reduktorem a podobně. Pilotovi však bude umožněno volit nastavení podle režimu letu. To znamená malý úhel listů pro vysoké otáčky při vzletu a vyšší úhel listů při přeletech.

Stavěcí mechanismus, zabudovaný v náboji vrtule, je poháněn elektrickým stejnosměrným motorem, jehož otáčky jsou redukovány převodovkou. Protože je unašeč konstruován pro motorový kluzák, očekává se využití vrtulového pohonu jen jako podpůrného prostředku.

Zatížení a konstrukční návrh je prováděn pro již navržený a pevnostně zkontrolovaný list vrtule.

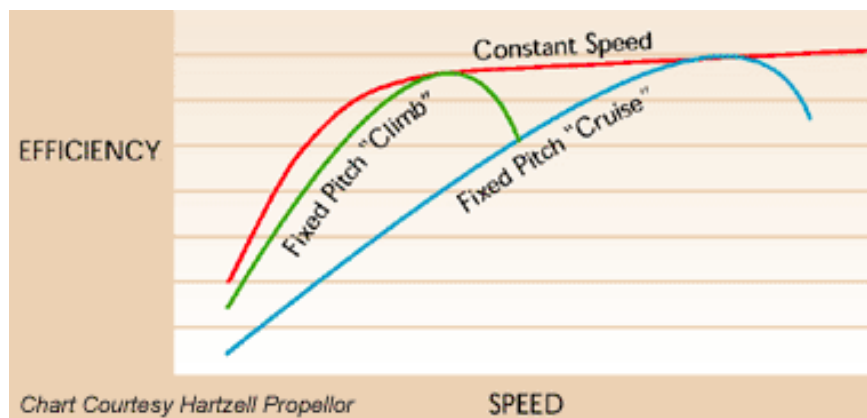
## 2 Mechanismy a používané systémy

### 2.1 Historie stavitelných mechanismů vrtulí

Letecké vrtule prošly od samých počátků oboru vzdušné avioniky značným konstrukčním vývojem od „zkroucených desek“ až po dnešní aerodynamicky téměř dokonalé typy, navržené s pomocí té nejmodernější výpočetní techniky. Průkopníci letectví již po raných pokusech, spolu s nárůstem výkonů leteckých motorů, hledali cesty pro zvýšení účinnosti pro dosažení lepších letových vlastností letounů. Jednou z cest ke splnění vzrůstajících nároků byla právě možnost adaptace vrtule na určitý letový režim i jinak než pouhou změnou otáček motoru. To vedlo k vynálezu prvních vrtulí s možností přestavování úhlu listů. Z počátku pouze manuálně, na zemi při vypnutém motoru, podle očekávaného charakteru letu. Letouny krátce po první světové válce, vybavené tímto systémem, tak získaly značnou výhodu oproti starším strojům. Vývoj však pokračoval dále a postupně se začaly objevovat systémy dávající pilotovi možnost nastavit pákovým mechanismem listy za letu. Během třicátých let se konstrukční řešení dále vyvíjela tak, aby letci v druhé světové válce měli k dispozici již systémy automatické, ovládané pouhým stiskem tlačítka.

Letoun vybavený vrtulí s možností přestavování listů za letu umožňuje výrazné zlepšení klíčových letových vlastností. To znamená zejména:

- Zkrácení potřebné vzletové dráhy
- Zkrácení přistávací dráhy při použití reverzace tahu
- Vyšší stoupací rychlost
- Vyšší dostup letounu



Obr. 1 Porovnání účinnosti různých typů vrtulí [1]

## 2.2 Typy vrtulí

- **Pevná vrtule:** Jedná se o vývojově nejstarší typ. Listy mají přednastavený úhel stoupání jenž nelze měnit. Zpravidla se skládá z jediného kusu dřeva nebo hliníkové slitiny na ocelovém náboji. Jednoduchost konstrukce zaručuje značnou spolehlivost. V současné se tento typ používá v modelářství, u jednomotorových letounů menších výkonů a u historických strojů.
- **Na zemi stavitelná vrtule:** Mechanismus umožňuje uvolnění listů v náboji a přestavení úhlu náběhu při vypnutí motoru. Tento systém byl vyvinut ve 20. letech minulého století pro optimalizaci výkonu na očekávané parametry letu (délka dráhy, rychlost pro přelet a podobně).
- **Dvoupolohová vrtule:** Lze nastavit dva úhly stoupání. Menší úhel pro zkrácení dráhy při vzletu, větší úhel pro cestovní rychlost.
- **Za letu stavitelná vrtule:** Podle volby pilota dovoluje otáčet listy kolem své osy a tím měnit stoupání listů.
- **Vrtule stálých otáček:** Pilot nastavuje otáčky motoru. Úhel nastavení listů se mění automaticky dle režimu letu tak, aby otáčky motoru zůstaly zachovány. V případě, že se motor dostává do vyšších otáček, list se přestaví na větší úhel, tím se zvýší tah a otáčky poklesnou. Při příliš nízkých otáčkách se úhel nastavení zmenšuje. V současnosti se jedná o nejpoužívanější systém.

## 2.3 Sklápění listů

Sklopení listu vrtule po směru letu (někdy i proti), je účinný způsob, jak snížit aerodynamický odpor vrtule. Ze složené pozice se listy roztáhnou do pracovní polohy díky odstředivé síle listů. Při poklesu otáček vrtule, se tedy vlivem aerodynamického

odporu a často ještě s pomocí dalšího prvku (např. pružiny) listy začnou sklápět. Některé modely místo pružiny používají píst se stlačeným vzduchem (AMS Carat).

Výhodou je tedy snížení aerodynamického odporu a redukce vibrací které vznikají při obtékání nehybného listu (a které by se jinak daly řešit praporováním). Na druhou stranu, vrtule tohoto typu jsou oproti vrtulím nesklopným těžší, konstrukčně složitější a tím pádem dražší.

V leteckém modelářství a ultralehkém létání se sklopné vrtule (*folding propellers*) s oblibou využívají. Často se jedná o aplikace, kde se očekává využití pohonné jednotky spíše jako podpůrného zařízení a kde by byl klasický mechanismus praporování listů příliš konstrukčně složitý a tím pádem nákladný. Nemalou výhodou, zvláště v leteckém modelářství, je ochrana listů při přistání, kdy složená vrtule lépe odolá případnému nárazu do země [2].

První patent sklopné vrtule pro využití v leteckém modelářství byl schválen v USA roku 1945. Od 60. let minulého století se začínají využívat i u námořních aplikací, zejména závodních plachetnic [3].



Obr. 2 Sklopná vrtule pro model letadla [4]

### 2.3.1 Modely a motorové kluzáky

Sklápění je téměř vždy řešeno přes čepový spoj, který zajišťuje jednoduchý a spolehlivý chod. V leteckém modelářství jsou listy často ve sklopené pozici udržovány gumíčkou, která zajišťuje, že list nezůstane „viset“ vlivem gravitace. U větších strojů, zejména kluzáků, je tento problém řešen pomocí ozubení v uchycení listů. Listy jsou tak



mechanicky vzájemně propojeny, což zabraňuje situaci, kdy jeden list je sklopený a další ne. Existují i konstrukční řešení využívající pružiny. Například německý motorový kluzák B13electric má listy přidržené zkrutnými pružinami.



*Obr. 3 Tlačná vrtule na kluzáku [5]*

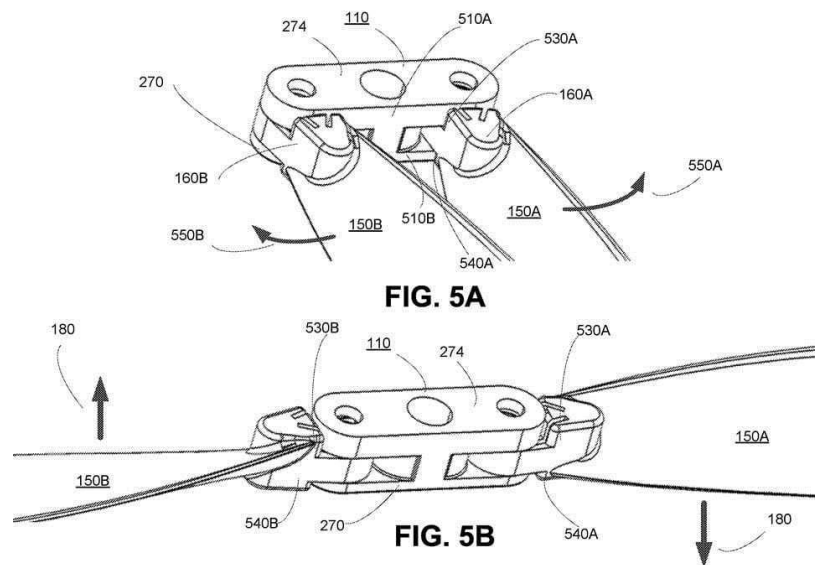


*Obr. 4 Fixace listů pomocí torzních pružin [6]*

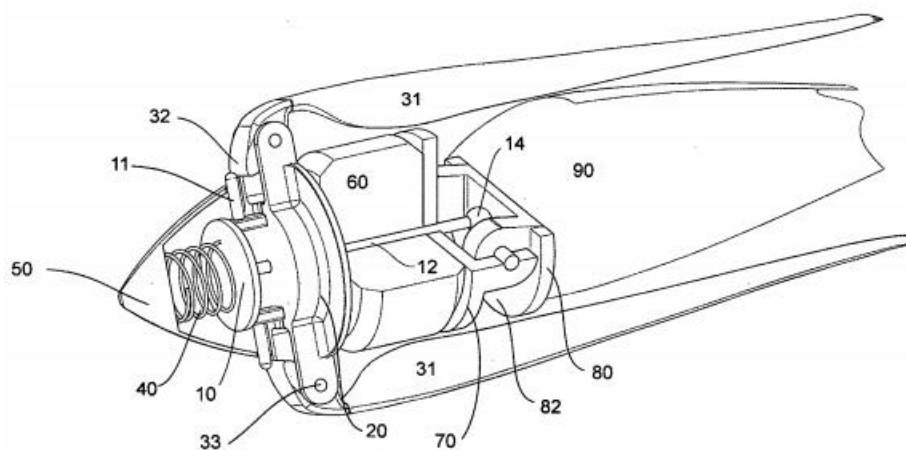
### 2.3.2 Drony a UAV

S celosvětovým rozmachem používání vojenských a civilních dronů vznikla další oblast, kde je velmi výhodná možnost sklápění listů. Na rozdíl od předchozích aplikací, v tomto případě není cílem zlepšení aerodynamických vlastností, ale především redukce rozměrů a tím pádem lepší skladování. Listy jsou většinou uchyceny velmi jednoduše čepovým spojem.

Společnost GoPro získala patent na samosklápěcí vrtule (viz. Obr. 5), jejíž listy se sklápějí samovolně, díky dvěma zkrutným pružinám v úchytech.



Obr. 5 Sklápění listů pomocí zkrutných pružin [7]



Obr. 6 Sklopná vrtule s tlačnou pružinou pro UAV [8]

## 2.4 Mechanismus nastavení úhlu listů

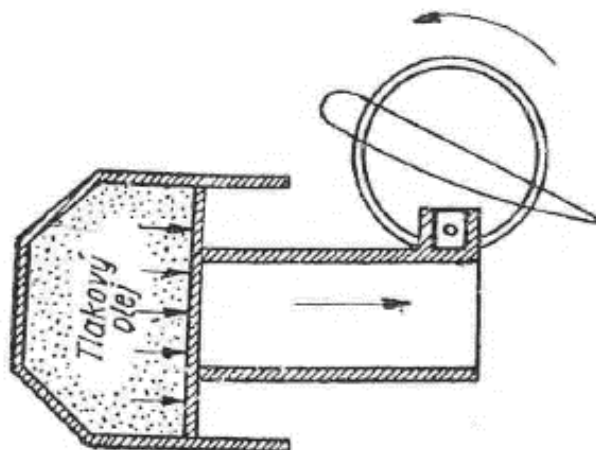
Za letu stavitelná vrtule musí být schopna synchronizovaného otáčení listů kolem osy kolmé na osu rotace.

Nastavení stoupání vrtule může být řízeno

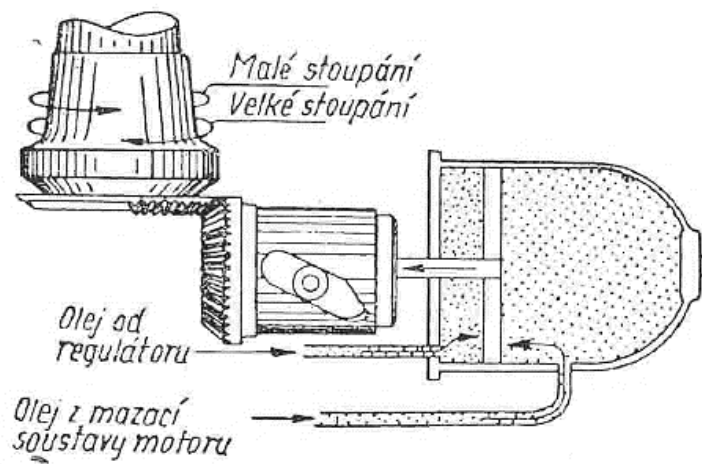
- Manuálně zásahem pilota
- Automatickým regulátorem – pilot nastavuje otáčky vrtule, proto se tento typ nazývá vrtule stálých otáček (constant-speed). Regulátor je nejčastěji odstředivý. Existují i řešení využívající rychlost letu, polohu škrtící klapky motoru apod. [9]
- Samočinným vyvažováním

Některé vrtule jsou konstruovány jako tzv. praporovatelné. To znamená, že umožňují nastavení do polohy nejmenšího čelního odporu, případně do polohy brzdící, kdy vyvozují záporný tah. [9]

Samotný převod axiální síly z elektromotoru na otáčivý pohyb listů v pracovním rozsahu (případně až do praporu) je nejčastěji realizován pákovým převodem. Pohyb z pístu, válce, nebo matice na pohybovém šroubu, je veden přes excentrický čep na objímce listu. U jednočinných servomechanismů stačí, když působí jen jedním směrem a zpět se list natočí samočinně. Pro dvojčinné mechanismy platí, že je vazba pevná na obě strany. Dalším způsobem je převod pomocí kuželového soukolí. Rotační pohyb je na pohyb posuvný převeden vačkovým mechanismem.



Obr. 7 Natáčení listu pákovým převodem [9]



Obr. 8 Převod kuželovým soukolím [9]

## 2.5 Hydraulická vrtule

Náboj vrtule obsahuje hydraulický píst, ze kterého je posuvný pohyb převeden na rotační. Podle zdroje oleje může být mechanismus neautonomní, tedy odebírající olej z motoru a autonomní, kdy olej pochází z vlastního okruhu. Tlak oleje je zvyšován zubovým čerpadlem, které je poháněno motorem. [9]

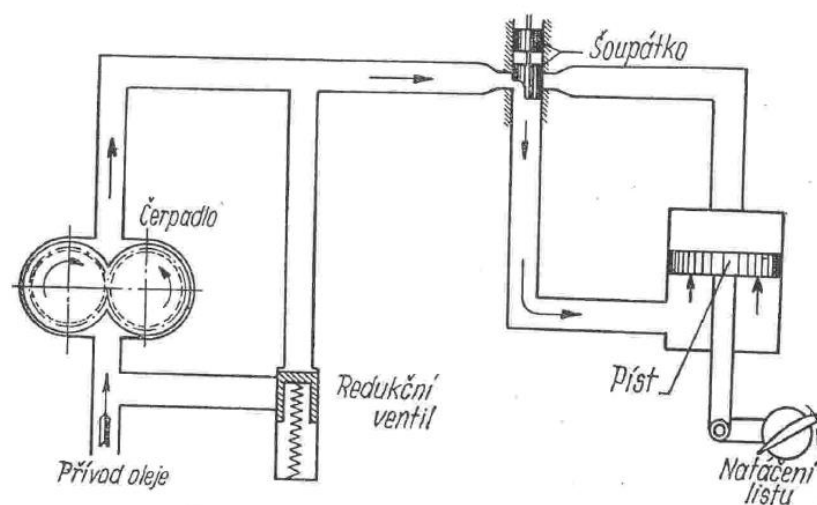
Existují tyto systémy přestavování listů

- Jednočinné (Single acting PCM)
- Dvojčinné (Double acting PCM)

U jednočinného systému tlak oleje působí jen na jednu stranu pístu, pohyb zpět zajišťuje pružina nebo závaží v kořeni listu. Ve dvojčinném systému probíhá nastavování většího či menšího stoupání střídavým působením tlakového oleje z obou stran pístu. [9]

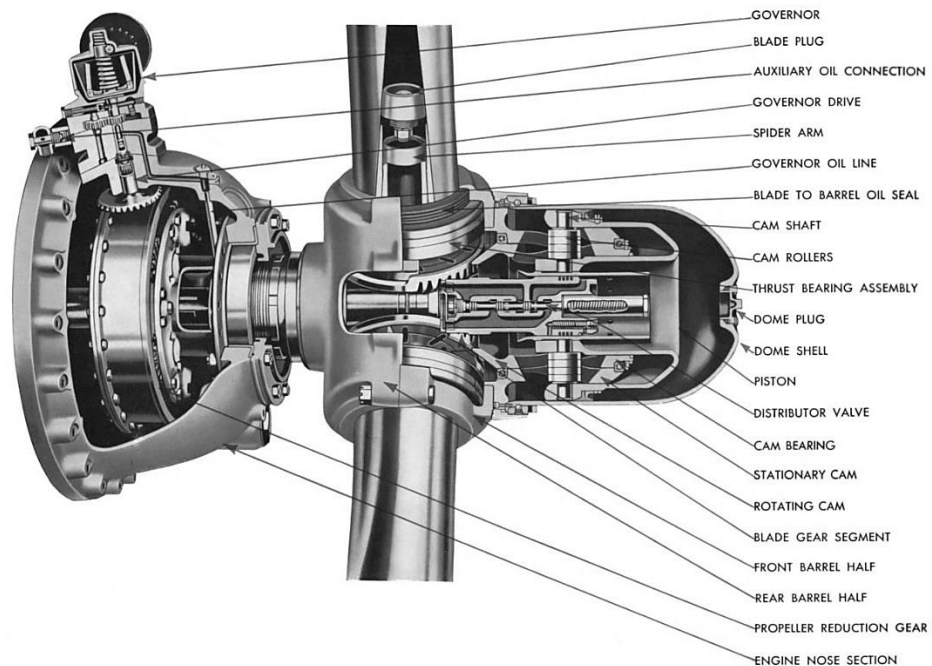
Píst může být

- Nehybný, pevně spojený s nábojem vrtule a posouvající celým pístovým válcem
- Klasický pohyblivý píst v nepohyblivém válci. [9]



Obr. 9 Schéma hydraulického převodu [9]

### 2.5.1 Hamilton Standart Hydromatic Propeller



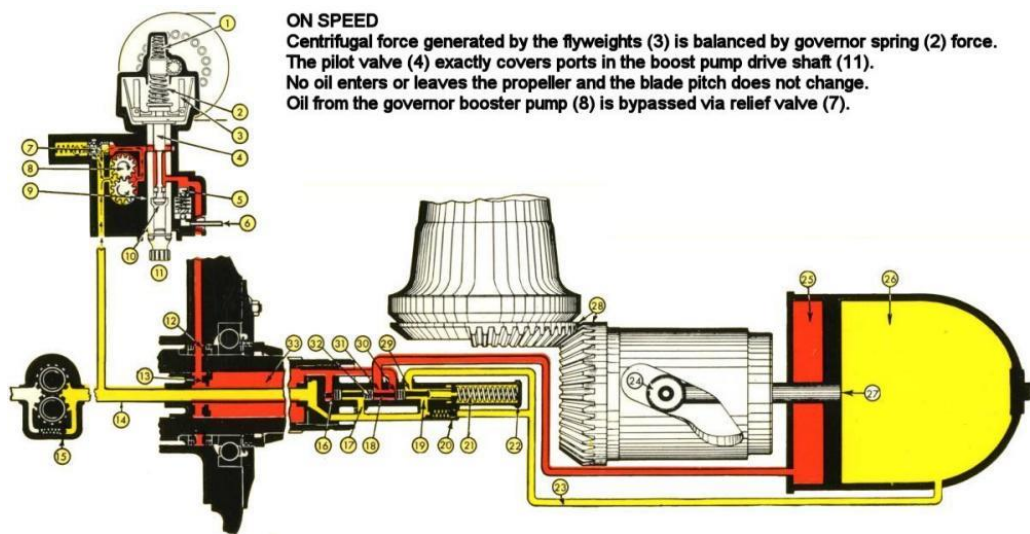
Obr. 10-Průřez systémem Hamilton Standart Hydromatic propeller [10]

V roce 1938 byl americkou společností Hamilton Standart představen nový typ stavitelné hydraulické vrtule, konstruovaný především pro rozměrné listy, vyšší rychlost přestavování a snadnější synchronizaci většího počtu listů. Zároveň výrobce reagoval rostoucí nároky na bezpečnost letecké dopravy tím, že zavedl efektivní, rychlý a spolehlivý mechanismus prapоровání listů u vícemotorových letounů. Výpadkem tahu motoru a odporem listů totiž docházelo ke značnému aerodynamickému odporu a vibracím, které často vedly až k destrukci konstrukce s katastrofickými následky. Konstrukce umožňovala rychlé nastavení listů kolmo na nabíhající proud vzduchu pouhým stiskem tlačítka, nezávisle na tlaku motorového oleje díky nezávislému čerpadlu. To brzy ocenily především posádky bojových letounů.

Pro zkrácení dráhy při přistání je výhodná reverzace tahu. Problematický při přechodu do tohoto režimu je především úhel kdy list klade nejmenší odpor a hrozí přetočení motoru. Tento úhel je tedy potřeba co nejrychleji překonat. Tento požadavek konstrukce splnila a přestavení trvalo kolem tří sekund.

Tímto typem byly vybaveny letouny jako Boeing B-17 F&G, Boeing B-29 Superfortress, North American P-51 Mustang, Grumman F6F Hellcat a mnoho dalších strojů na straně Spojenců za druhé světové války. [11]

Na rozdíl od ostatních konstrukcí té doby nevyužívá protizávaží v kořenech listů. Pohyb pístu je realizován pomocí odstředivého regulátoru (*governoru*), který rozvádí tlak motorového oleje na jeho obě strany. Při nastavování na menší úhel spolu s tlakem oleje, zvýšeným motorovým čerpadlem, působí zároveň i kroutící moment od odstředivé síly listu. Tlak oleje z motoru potřebného pro nastavení většího úhlu je zvýšen dalším čerpadlem v regulátoru. Posuvný pohyb je dále přeměněn na rotační pomocí vačkového mechanismu. Ozubený čep, který je takto poháněn, otáčí přes ozubenou vazbu listem vrtule.



Obr. 11 Schéma systému Hamilton Standart Hydromatic Propeller [11]

## 2.6 Mechanická vrtule

Listy jsou přestavovány buď převodem síly pilota z kabiny, nebo silou motoru pohánějícího vrtuli. Z kabiny bývá vyveden bowden, nebo páka hydraulického systému, který poté ovládá páku na náboji. Mechanismus využívající sílu pilota je však kvůli vysokým zatížením nevhodný pro vrtule letounů vyšších výkonů [9]. Moment z motoru využívaný k přestavování listů je přiveden přes zubovou či třecí spojku.



*Obr. 12 Páka ovládání mechanické vrtule značky Kaspar [12]*

## 2.7 Elektricky stavitelné vrtule

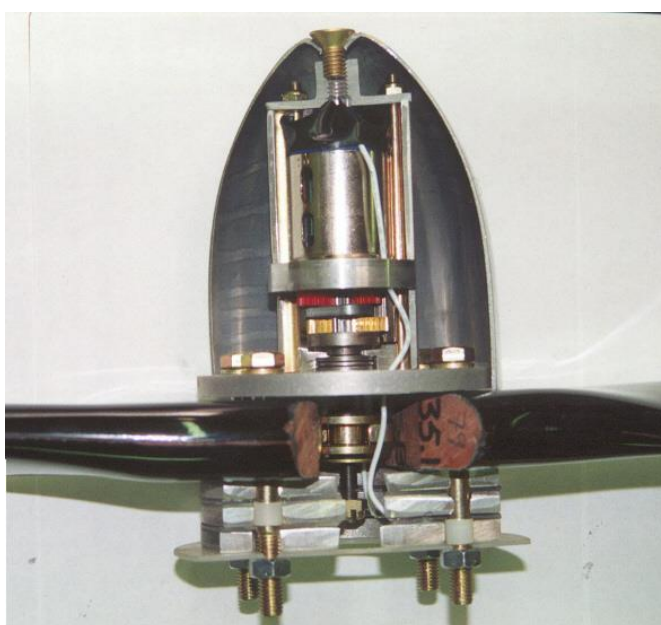
Mechanismus přestavování úhlu nastavení listů je v tomto případě poháněn pomocí reverzibilního elektromotoru. Vzhledem k vysokým otáčkám elektromotorů je potřeba použít reduktor, zpravidla planetový. Elektromotor s převodovkou se umísťuje zpravidla do přední části náboje. Samotný převod momentu elektromotoru je přes pohybový šroub. Kinematická vazba do kořene listu je, podobně jako u hydraulických systémů, přes klikový mechanismus nebo kuželová ozubená kola. Mezi výhody patří, do určité míry nezávislost na výkonu motoru letadla. Dále je třeba zmínit snadnou údržbu a relativně „čistou“ montáž a demontáž. U tohoto typu dochází nejčastěji k opotřebení sběrných kartáčů, přes které je napájen elektromotor.





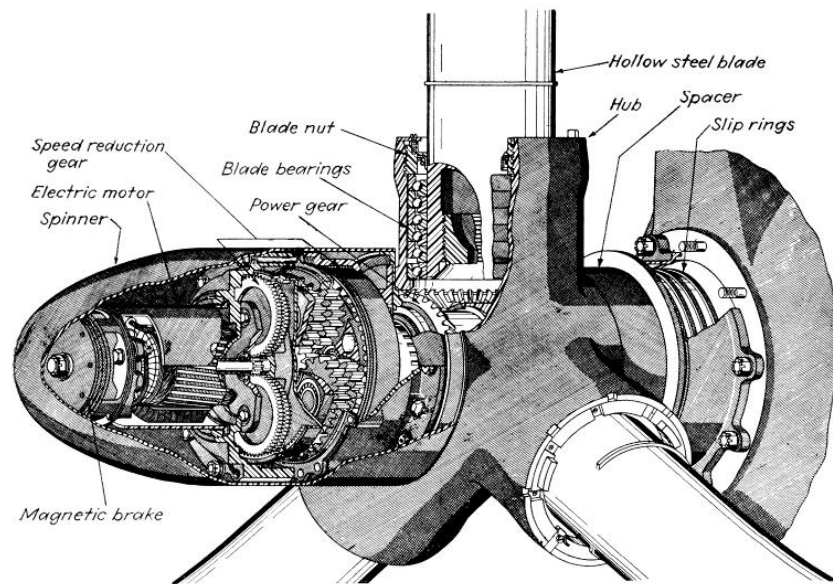
*Obr. 13 Stavěcí mechanismus společnosti Woodcomp [13]*

Značně neobvyklý systém používá Ivoprop, společnost československého emigranta Iva Ždárského. Tento systém spočívá v pevném uchycení listů a jejich kroucení pomocí torzních tyčí probíhajících jejich délkou. Tyto tlačné vrtule jsou určeny pro kategorii ultralehkého letectví.



*Obr. 14 Vrtule systému Ivoprop [14]*

### 2.7.1 Curtiss Electric Propeller



Obr. 15 Curtiss Electric propeller [11]

Americká společnost Curtiss vsadila na výrobu elektricky stavitelných vrtulí. Ty byly nasazeny už za druhé světové války, především na jednomotorových stíhacích strojích a lehkých dvoumotorových bombardérech.

Jedná se o klasický případ konstrukce elektricky stavitelné vrtule. Krouticí moment elektromotoru, který je napájený ze sítě letounu stejnosměrným napětím o velikosti 28 V, pohání reduktor otáček. Ten je hřídelem spojený s kuželovým ozubením, které otáčí jednotlivými listy vrtule. Motor je reverzibilní, s připojenou magnetickou brzdou, která v případě výpadku proudu zablokuje mechanismus a zamezí tak samovolným změnám úhlu nastavení. Jako pojistka proti překročení mezních úhlů, je v náboji zabudovaná soustava třech koncových spínačů pro maximální úhel nastavení, minimální úhel nastavení a praporování. Vrtule umožňující zpětný tah mají navíc spínač pro nastavení vhodného úhlu reverze.

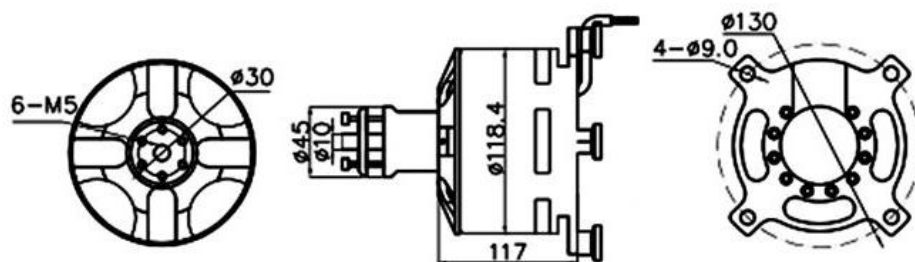
Ovládací spínač v kabině pilota umožňuje čtyři volby – „Off“, „Automatic“, „Increase RPM“ a „Decrease RPM“. Regulátor zajišťující udržování nastaveného režimu je mechanický, fungující na principu odstředivých sil.

Aby bylo při výjimečných stavech možné co nejrychleji přestavit listy do polohy praporu, nebo do polohy reverzace tahu, je v elektrickém obvodu zapojen zesilovač napětí-dynamo. Ten je schopen dočasně zvýšit napětí z běžných 28 V až na hodnotu 65 V.

Výhodou elektrického systému společnosti Curtiss je především spolehlivost a hlavně snadná a čistá údržba (na rozdíl od hydraulického systému Hamilton). Protože však mechanismus nabyl přímo spojen s motorem, čas od času docházelo k poruchám. Například při vzletech, kdy v letounu byl navíc slabý akumulátor. Odstředivý regulátor sice správně vyhodnotil vysoké otáčky, slabší napětí stačilo pouze k vypnutí magnetické brzdy, ale už nestačilo k překonání odstředivého krouticího momentu vrtule a docházelo k přetočení. [15]

### 3 Pohonná jednotka

Motorový kluzák bude poháněn elektromotorem 120100/S s výkonem 25kW a otáčkami bez zatížení 3350 ot/min.



Obr. 16 Schéma elektromotoru [16]



Obr. 17 Hnací elektromotor [16]

## 4 Požadavky na konstrukci

Náboj vrtule musí být co nejspolehlivější, což znamená konstrukčně co možná nejjednodušší. Vzhledem k odstředivým a vibračním silám, které na celek působí je nutná vhodná volba materiálů, vysoká tuhost a zároveň co nejnižší hmotnost.

Rozsah nastavování úhlů listů musí umožnit co nejlepší využití výkonu motoru a být funkční v celém spektru otáček.

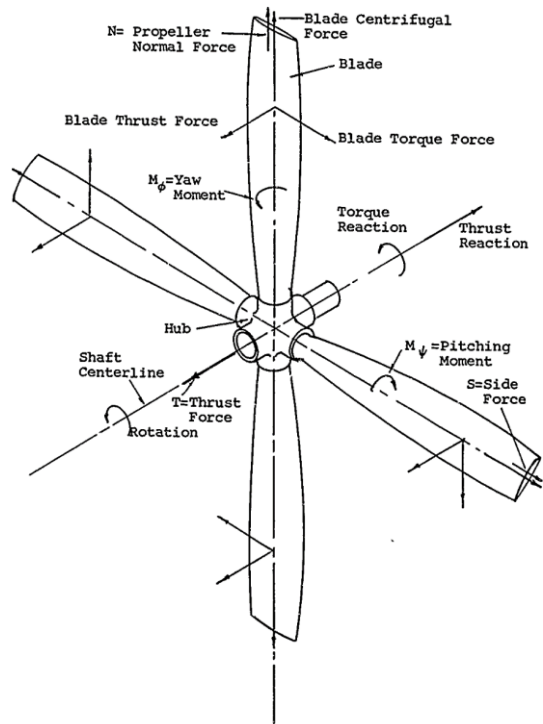
Aircraft Type	Design Speed (m.p.h.)	Blade Angle Range	Low	Pitch	High
Fixed Gear	160	11 $\frac{1}{2}$ °	10 $\frac{1}{2}$ °		22°
Retractable	180	15°	11°		26°
Turbo Retractable	225/240	20°	14°		34°
Turbine Retractable	250/300	30°	10°		40°
Transport Retractable	325	40°	10/15°		50/55°

Obr. 18 Orientační hodnoty rozsahu úhlů nastavení listů pro vrtule stálých rychlostí [17]

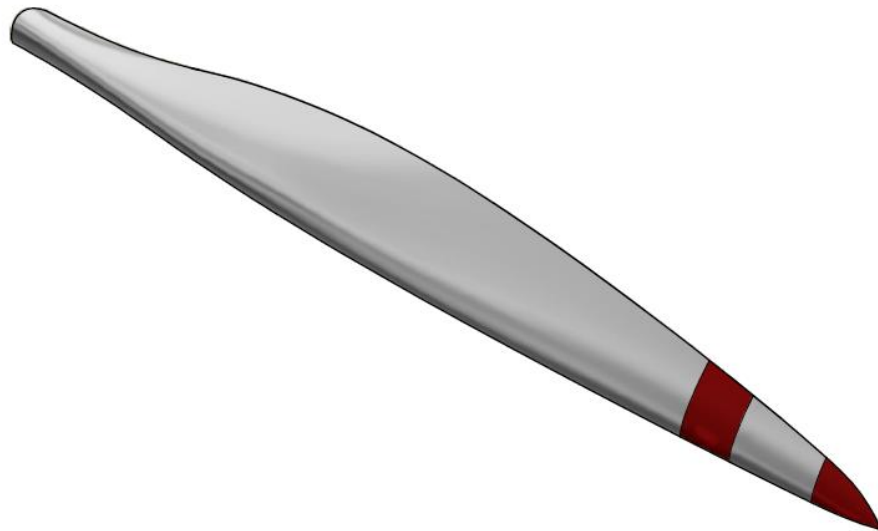
Například mechanicky stavitelná Kompozitní vrtule KA-1 od výrobce Kašpar a synové umožňuje stavění listů v rozsahu 14°. Vrtule společnosti Woodcomp umožňují stavění v rozsahu 12°. Platí tedy, že čím výkonnější a rychlejší letoun, tím vyšší rozsah nastavení úhlu listů

Vzhledem k exponovanosti celku je nutná odolnost proti specifickým povětrnostním podmínkám. To zahrnuje například těsnění otvorů proti vniknutí vody.

Mechanismus musí být vybaven seřiditelnými koncovými spínači pro nejmenší a největší úhel nastavení listů vrtule [9]. To je nutné zvláště pro případy poruchy. Listy také musí být schopny sklopení podél osy náboje při vypnutí motoru. To i v případech kdy je vrtule nastavená na úhel stoupání jiný než výchozí.



Obr. 19 Síly a momenty působící na vruli [9]



Obr. 20 List vrtule navržený v [18]

## **4.1 Předpisové požadavky**

Protože se jedná o letadlového systému, je potřeba vzít v úvahu předpis. Níže je uveden přehled požadavků na konstrukci unašečů vrtulí podle aktuálních předpisů platných v ČR.

### **4.1.1 UL-2**

Tento předpis Letecké amatérské asociace se o konkrétních požadavcích na systém nastavení úhlu listu nezmiňuje. Pouze uvádí, že:

„Otáčky a nastavení vrtule musí být omezeny na hodnoty, které účinně zajišťují bezpečný provoz v normálních provozních podmínkách.

1. Během vzletu a stoupaní rychlostí doporučenou pro nejlepší stoupavost musí vrtule omezit otáčky motoru při plně otevřené přípusti tak, aby nepřekročily maximálně přípustné otáčky.
2. Během klouzavého letu rychlostí VNE s uzavřenou přípustí nebo zastaveným motorem nesmí vrtule dosáhnout takových otáček, které by překročily 110 % maximálních přípustných otáček motoru nebo vrtule (rozhodující je nižší hodnota).“ [19]

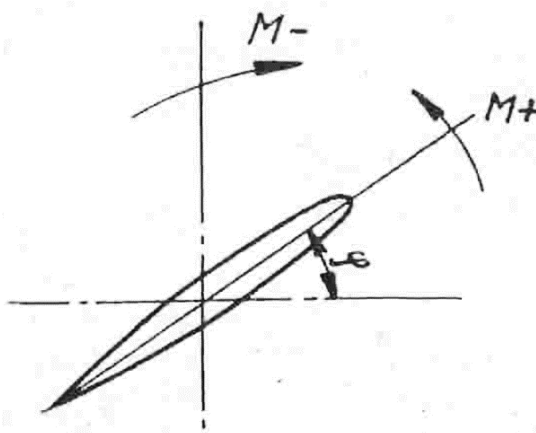
## 5 Zatížení náboje

Náboj sklopné stavitelné vrtule je komplexně namáhaná část letounu. Hlavní původci zatížení jsou vrtulové listy, kroučící moment hřídele motoru, síly z natáčecího ústrojí vrtule a vibrace. Kroučící moment od hřídele bývá dominantní především při spouštění motoru, jinak největší zatížení pochází z odstředivých sil listů [9].

Kroučící moment, jenž nastavuje úhel stoupání listu je realizován kolíkovým mechanismem, který převádí lineární pohyb z pohybového šroubu. Aby bylo možné tento mechanismus navrhnout, je potřeba spočítat jednotlivé momenty a ty posléze sjednotit do jednoho momentu v ose listu.

Protože je rychlost otáčení listu kolem osy velmi malá, bude moment setrvačnosti v této ose zanedbán.

Momenty, které zvyšují úhel náběhu jsou považovány za kladné, momenty tento úhel zmenšující jsou záporné.



Obr. 21 Znaménka momentů k řezu listu [9]



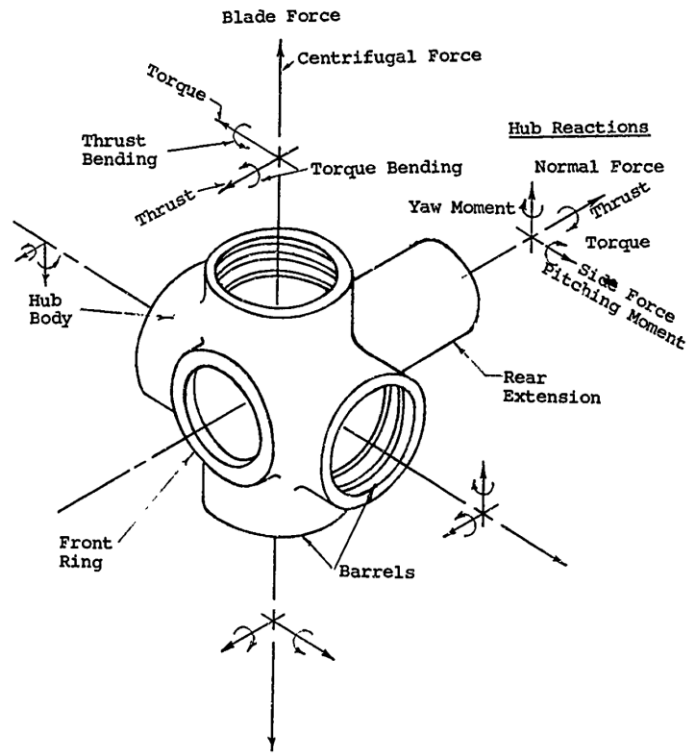
Při výpočtech se vychází z parametrů vrtule navržené v [18].

$r/R$	$r$	$\varphi$	$b$	$t$	$\tau$	$c/4$
[1]	[mm]	[°]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]
0	0	77,5	28	16,8	60	7
0,1	75	77,5	28	16,8	60	7
0,2	150	65,5	34	11,9	35	8,5
0,3	225	55,5	54,2	10,9	20	13,6
0,4	300	47,5	65,2	11,7	18	16,3
0,5	375	41,1	67,7	8,1	12	16,9
0,6	450	36	64,3	6,4	10	16,1
0,7	525	32	57	5,7	10	14,3
0,8	600	28,7	46,8	4,7	10	11,7
0,9	675	26	32,9	3	9	8,2
0,99	740	24	10,3	0,8	8	2,6
1	750	0	0	0	0	0

*Tab. 1 Geometrické parametry vrtule*

Na mechanismus náboje působí následující síly a momenty

- Odstředivá síla  $F_o$
- Ohybový moment  $M_o$
- Moment odstředivých sil listu  $M_{\omega}$
- Moment aerodynamický sil  $M_a$



Obr. 22 Zatížení působící na náboj vrtule [20]

## 5.1 Odstředivá síla $F_o$

Odstředivá síla působí kolmo na osu rotace a směřuje ven od ní. Snaží se tedy „vytrhnout list ven“. Její působiště je v těžišti hmoty. Jedná se o nejdominantnější sílu, která na vrtuli působí.

Elementární odstředivá síla je dána vztahem:

$$dF_o = \omega^2 r dm \quad (1)$$

Kde je element hmoty je dán jako:

$$dm = \rho S dr \quad (2)$$

$\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$  – hustota kompozitu uhlík-epoxid

Úhlová rychlost je vypočtena ze vztahu:

$$\omega = 2\pi n = 2\pi \frac{2000}{60} = 209,44 \text{ rad/s} \quad (3)$$

Kde:

$n = 2000 \text{ ot/min}$  – otáčky vrtule

Plocha  $S$  v řezu je:

$$S = k_3 bt \quad (4)$$

Kde:

$k_3 = 0,725$  – Koeficient vyjadřující poměr plochy profilu Clark Y a plochy obdélníku o rozměrech hloubky  $b$  a tloušťky listu  $t$ . [9]

Výsledná síla je řešena numericky

$$F_o = \int_{0,075}^{0,74} \left(2\pi \frac{n}{60}\right)^2 r \rho k_3 bt dr = 4632,84 \text{ N} \quad (5)$$

r/R	S	$\omega$	dFo	Fo
[1]	[m2]	[rad/s]	[N]	[N]
0	0,000	209,440	0,000	4632,838
0,1	0,000	209,440	75,733	4557,105
0,2	0,000	209,440	195,419	4361,685
0,3	0,000	209,440	475,572	3886,114
0,4	0,001	209,440	859,710	3026,404
0,5	0,000	209,440	794,578	2231,826
0,6	0,000	209,440	728,793	1503,034
0,7	0,000	209,440	680,007	823,027
0,8	0,000	209,440	531,197	291,830
0,9	0,000	209,440	270,138	21,692
0,99	0,000	209,440	21,692	0,000
1	0,000	209,440	0,000	0,000

Tab. 2 Odstředivá síla listu



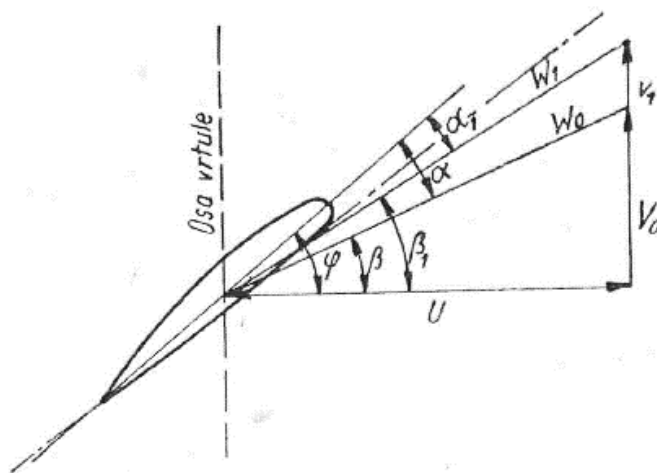
Obr. 23 Průběh odstředivé síly

## 5.2 Kroucí moment od aerodynamických sil $M_a$

Profil generuje vztlakovou sílu  $Y$ , jejíž působíště se nenachází v ose otáčení listu a tudíž vytváří kroucí moment  $M_a$ . Tento moment má tendenci zvětšovat úhel nastavení vrtule.

K výpočtu je potřeba určit rychlost nabíhajícího proudu vzduchu  $W_1$  v závislosti na poloměru vrtule. Tato rychlost spolu s rychlostním úhlem  $\beta_1$  je získána z dat vypočtených v [18], kde jsou již zohledněny indukční složky rychlostí.

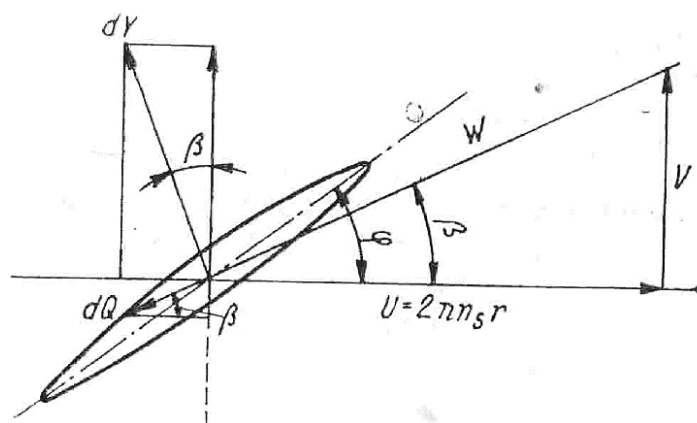
Známy je i návrhový úhel náběhu, který má konstantní hodnotu  $\alpha_1=0,7^\circ$



Obr. 24 Rychlostní trojúhelník na řezu [9]

Platí, že rychlostní úhel  $\beta_1$  se rovná:

$$\beta_1 = \varphi - \alpha_1 \quad (6)$$



Obr. 25 Vztlaková síla působící na řez [9]

Vztah pro vztlakovou sílu je

$$dY = \frac{1}{2} \rho W_1^2 c_l b dr \quad (7)$$

$c_l = 0,5$  [1] – návrhový součinitel vztlaku

Krouticí moment k ose aerodynamického středu ( $x_{AC}=0,25b$ ) je dán vztahem:

$$dM = \frac{1}{2} \rho W_1^2 c_{m0} b^2 dr \quad (8)$$

Z aerodynamických charakteristik pro profil Clark Y byla zjištěna hodnota součinitele klopivého momentu při  $Re=500000$  a  $\alpha=0,7^\circ$ . Uvedená hodnota Reynoldsova čísla odpovídá referenčnímu místu v 75 % poloměru vrtule.

$$c_{m0} = -0,085 [1]$$

Úvaha popsaná Alexandrovem v [9] pro vyšetřování výsledného momentu je následující. Předpokladem je, že osa otáčení listu se nachází v těžišti průřezu. Na náběžnou hranu převedeme dvě síly  $Y$ , každou v opačném směru. Tím vytvoříme dvojici sil  $YY$  a sílu  $Y$ . Dvojice  $YY$  tvoří moment  $M$  k aerodynamickému středu průřezu. Síla  $Y$  tvoří moment na rameni vzdálenosti náběžné hrany a těžiště průřezu, označeném jako  $x_T$ .

Moment čelního odporu je kvůli malé velikosti zanedbán.

Výsledný moment je dán rovnicí:

$$dM_a = dYx_T - dM \quad (9)$$

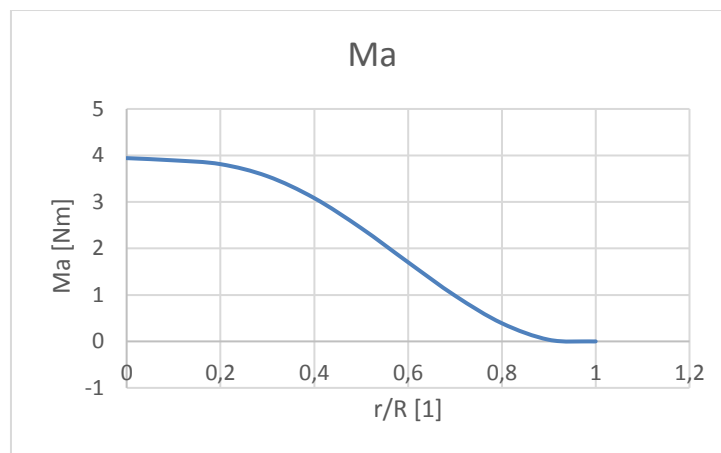
$\bar{x}_T = 0,42 [1]$  – poměrná vzdálenost těžiště profilu od náběžné hrany

Dosažením rovnic (7) a (8) do (9) získáme

$$dM_a = x_T \frac{1}{2} \rho W_1^2 c_l b dr - \frac{1}{2} \rho W_1^2 c_{m0} b^2 dr \quad (10)$$

Numerickou integrací po poloměru získáme konečnou hodnotu

$$M_a = 3,94 Nm \quad (11)$$



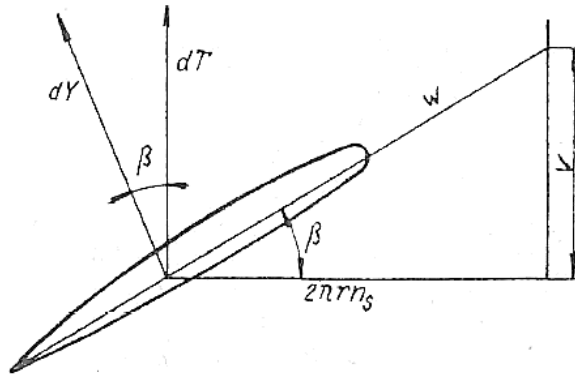
Obr. 26 Průběh momentu aerodynamických sil po poloměru

r/R	r	dMa	Ma
[1]	[mm]	[Nm]	[Nm]
0	0	0,599	3,942
0,1	75	0,048	3,894
0,2	150	0,082	3,813
0,3	225	0,260	3,553
0,4	300	0,471	3,082
0,5	375	0,645	2,437
0,6	450	0,734	1,703
0,7	525	0,718	0,984
0,8	600	0,594	0,390
0,9	675	0,355	0,035
0,99	740	0,035	0,000
1	750	0,000	0,000

Tab. 3 Hodnoty momentu od aerodynamických sil

### 5.3 Ohybový moment od tahové síly $M_o$

List vrtule při svém pohybu generuje určitý tah, který je kolmý na rovinu rotace propulsoru a směřuje dopředu. Vytváří tak moment, který list vrtule ohýbá ve směru osy vrtule. Tento moment přímo nepůsobí na samotný stavěcí mechanismus a musí být zachycen ložisky v uložení listu.



Obr. 27 Aerodynamické síly na profilu [9]

Vztlak je dán rovnicí

$$dY = \frac{1}{2} \rho W^2 c_l b dr \quad (12)$$

Odporová síla  $dQ$  kolmá na  $dT$  je dána jako

$$dQ = \frac{1}{2} \rho W^2 c_d b dr \quad (13)$$

$c_d = 0,00663$  – návrhový součinitel odporu

Element tahové síly lze vyjádřit jako

$$dT = dY \cos \beta - dQ \sin \beta \quad (14)$$

Element ohybového momentu je dán rovnicí

$$dM_o = dT(r - r_0) \quad (15)$$

$r_0 = 0,75 \text{ m}$  – délka listu

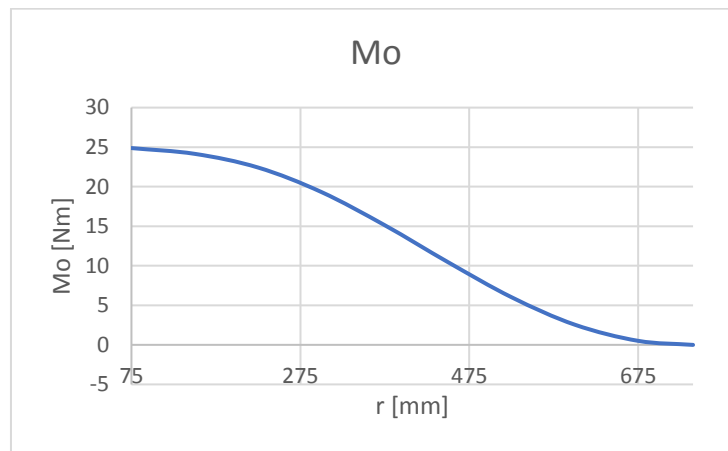
Dosažením rovnic (12), (13) a (14) do (15) dostaneme:

$$dM_o = \left( \frac{1}{2} \rho W^2 c_l b \cos \beta - \frac{1}{2} \rho W^2 c_d b \sin \beta \right) (r - r_0) dr \quad (16)$$



Integrací po délce listu dostáváme velikost ohybového momentu

$$M_o = 25,006 \text{ Nm}$$



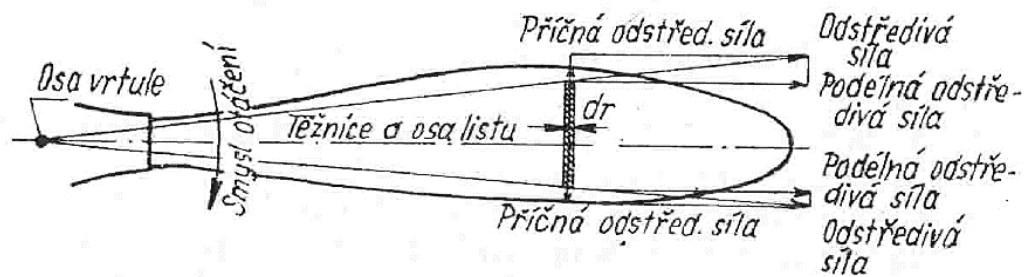
Obr. 28 Průběh tahového ohybového momentu

r/R	r	dMo	Mo
[1]	[mm]	[Nm]	[Nm]
0	0	27,172	25,006
0,1	75	0,419	24,587
0,2	150	1,010	23,577
0,3	225	2,412	21,165
0,4	300	3,720	17,445
0,5	375	4,564	12,881
0,6	450	4,693	8,189
0,7	525	4,074	4,115
0,8	600	2,829	1,286
0,9	675	1,233	0,053
0,99	740	0,053	0,000
1	750	0,000	0,000

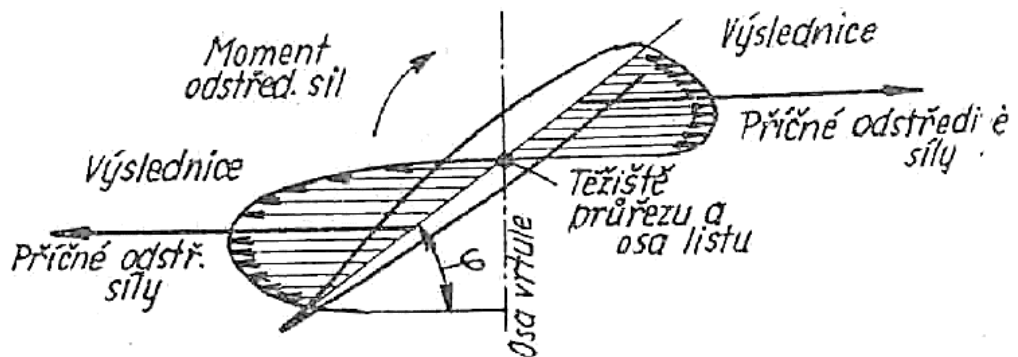
Tab. 4 Hodnoty ohybového momentu

## 5.4 Moment odstředivých sil $M_\omega$

Na list působí další odstředivá síla, působící v rovině rotace a kolmé na osu otáčení. Tato síla list namáhá krutem a také ohybovou silou. Po rozložení jejího vektoru na podélnou a příčnou složku (Obr. 29), sledujeme v příčném elementárním řezu dva vektory sil opačné orientace (Obr. 30). Tyto vektory příčné odstředivé síly vytváří moment kolem osy listu. Integrací těchto momentů po délce listu získáme tak zvaný moment odstředivých sil  $M_\omega$ , který zkrucuje list. Tento moment má tendenci snižovat úhel nastavení, proto je nutné ho uvažovat při návrhu stavěcího ústrojí vrtule.

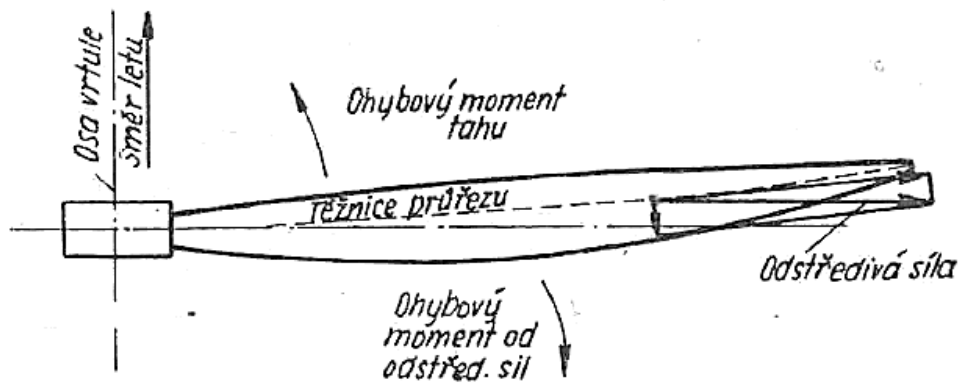


Obr. 29 Rozložení odstředivých sil [9]



Obr. 30 Odstředivé síly na řezu [9]

Je zřejmé, že příčná složka odstředivé síly namáhá list ohybem. Tato síla působí proti aerodynamickým silám, tedy proti tahu.



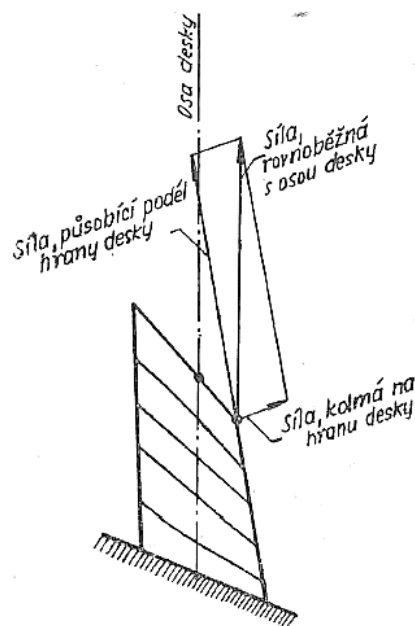
Obr. 31 Ohybové momenty na listu [9]

Alexandrov ([9]) nahrazuje list vrtule pásem zkrouceným do šroubové plochy (Obr. 32), namáhaným ve směru osy odstředivou silou. Tím ukazuje, že podélná síla list rozkrucuje a přispívá naopak ke zvětšování úhlu nastavení vrtule.

Ve výsledku tedy odstředivé síly způsobují

1. Zkrucování na menší úhel nastavení vlivem dvojice příčných sil
2. Zkrucování na větší úhel nastavení vlivem podélné složky

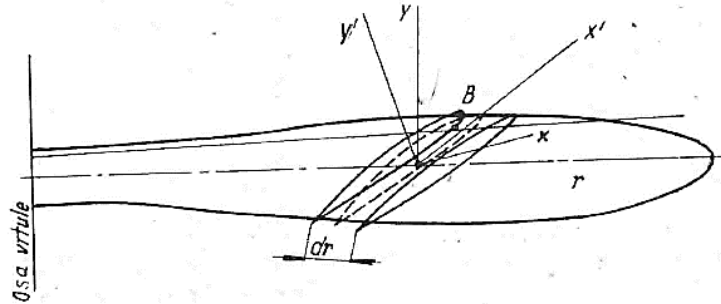
Na rozdíl od případu 1. je krouticí moment od podélné složky vnitřní reakcí a celkově list nenatáčí. Nepůsobí tedy na stavěcí mechanismus a tudíž se uvažuje jen při návrhu samotného listu. Protože však svou velikostí není příliš významný, často se zanedbává. [9]



Obr. 32 Aproximace deskou [9]

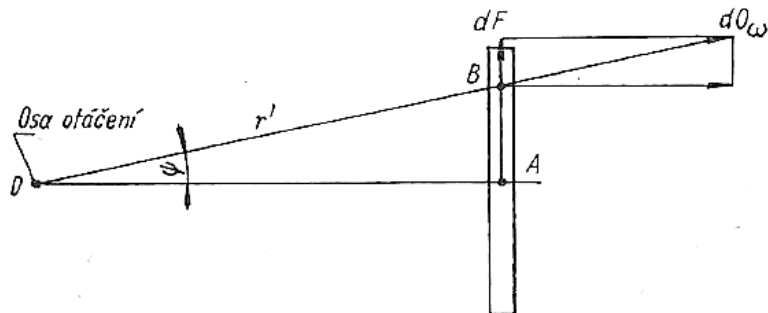
### 5.4.1 Odvození vzorce pro výpočet $M_\omega$ podle V. L. Alexandrova

Pro odvození vzorce momentu uvažujeme elementární hmotu mezi řezy vzdálenými o  $dr$  (Obr. 33). Pro začátek je potřeba vytvořit souřadnou soustavu následujícím způsobem: Osa  $r$  je ve směru osy listu, kolmo k ní a rovinu otáčení vrtule je osa  $x$ . Osa  $y$  je kolmá na obě předchozí.

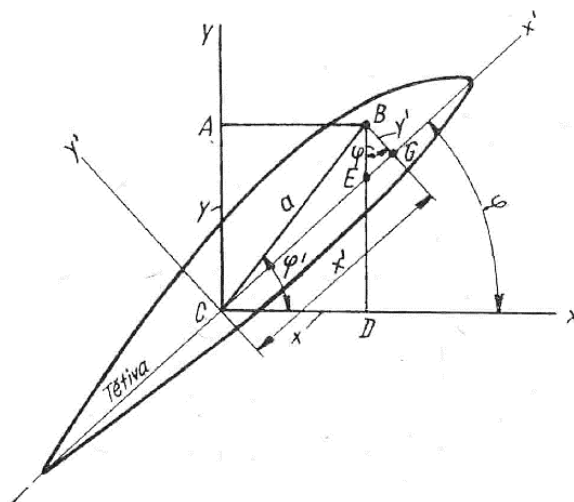


Obr. 33 Elementární hmotu mezi řezy [9]

V těžišti hmoty řezu vyznačíme bod  $B$  a zavedeme další souřadnou soustavu  $x'y'$ , která je oproti první soustavě natočená o úhel nastavení  $\varphi$  v místě řezu. Počáteční bod soustavy je stejný jako u předchozí.



Obr. 34 Působíště odstředivé síly [9]



Obr. 35 Souřadná soustava [9]

Pro odstředivou sílu v bodě B, tedy těžišti  $dm$  platí:

$$dO_{\omega} = \Omega^2 \cdot r' dm \quad (17)$$

Z trojúhelníku  $OAB$  (viz. Obr. 34) vyjádříme, že:

$$r' = AB / \sin \psi \quad (18)$$

Z trojúhelníku  $ABC$  (viz. Obr. 35) vyjádříme:

$$AB = a \cdot \cos \varphi' \quad (19)$$

Takže:

$$r' = \frac{a \cdot \cos \varphi'}{\sin \psi} \quad (20)$$

A po dosazení do (17):

$$dO_{\omega} = \Omega^2 \cdot \frac{a \cdot \cos \varphi'}{\sin \psi} \cdot dm \quad (21)$$

Tuto sílu lze v rovině rotace rozložit na složku rovnoběžnou a kolmou k ose listu.

Pro kolmou platí:

$$dF = dO_{\omega} \cdot \sin \varphi \quad (22)$$

Vytváří moment:

$$dM_{\omega} = dF \cdot AC = dF \cdot a \cdot \sin \varphi' \quad (23)$$

Dosazením (21), (22) a (23) získáme

$$dM_{\omega} = \Omega^2 \cdot a \cdot \cos \varphi' \cdot a \cdot \sin \varphi' \cdot dm \quad (24)$$

Příčemž souřadnice bodu B jsou:

$$x = a \cdot \cos \varphi' \quad (25)$$

$$y = a \cdot \sin \varphi' \quad (26)$$

A tedy:

$$dM_{\omega} = \Omega^2 \cdot x \cdot y \cdot dm \quad (27)$$

Pro řez o hmotnosti  $dm$  platí:

$$dm = \rho \cdot dS \cdot dr \quad (28)$$

Potom:

$$dM_{\omega} = \Omega^2 \cdot \rho \cdot x \cdot y \cdot dS \cdot dr \quad (29)$$

V rovnici lze vyjádřit vztah pro deviační moment:

$$dI_{xy} = x \cdot y \cdot dS \quad (30)$$

Rovnici (29) lze tedy zapsat jako:

$$dM_{\omega} = \Omega^2 \cdot \rho \cdot dI_{xy} \cdot dr \quad (31)$$

Integrací po ploše průřezu a délce listu získáváme:

$$M_{\omega} = \rho \cdot \Omega^2 \int_{r_0}^R I_{xy} \cdot dr \quad (32)$$

Protože se úhel nastavení  $\varphi$  mění s po délce listu, pro zjednodušení při výpočtu deviačního momentu, vztáhneme průřezy k souřadné soustavě  $x'y'$ .

Platí následující (viz. Obr. 33):

$$BD = ED + BE \quad (33)$$

Z trojúhelníku CED vyplívá:

$$ED = x \cdot \operatorname{tg}\varphi \quad (34)$$

Z trojúhelníku EBG vyplívá:

$$EB = y' / \cos\varphi \quad (35)$$

Potom tedy:

$$BD = x \cdot \operatorname{tg}\varphi + y' / \cos\varphi \quad (36)$$

A protože:

$$x' = CE + EG \quad (37)$$

Tak získáme:

$$x' = \frac{x}{\cos\varphi} + y' \cdot \operatorname{tg}\varphi \quad (38)$$

Po vyjádření  $x$ :

$$x = x' \cdot \cos\varphi - y' \cdot \operatorname{tg}\varphi \quad (39)$$

$$\begin{aligned}
y &= x' \sin\varphi - y' \operatorname{tg}\varphi \cdot \sin\varphi + \frac{y'}{\cos\varphi} \\
&= x' \sin\varphi + \frac{y'}{\cos\varphi} (1 - \sin^2\varphi) \\
&= x' \sin\varphi + y' \cos\varphi
\end{aligned} \tag{40}$$

Dosazením těchto rovnic do (30) a za předpokladu, že osy  $x'y'$  jsou hlavními osami setrvačnosti, získáme rovnici:

$$dI_{xy} = \frac{1}{2} \sin 2\varphi (x'^2 dS - y'^2 dS) \tag{41}$$

Největší hlavní moment setrvačnosti je:

$$I_{max} = \int x'^2 dS \tag{42}$$

Nejmenší hlavní moment setrvačnosti je:

$$I_{min} = \int y'^2 dS \tag{43}$$

A tedy:

$$dI_{xy} = \frac{1}{2} \sin 2\varphi (I_{max} - I_{min}) \tag{44}$$

Když dosadíme do (32):

$$M_{\omega} = \rho \cdot \Omega^2 \int_{r_0}^R \frac{1}{2} \sin 2\varphi (I_{max} - I_{min}) \cdot dr \tag{45}$$

Momenty setrvačnosti průřezu lze vyjádřit jako:

$$I_{max} = a_1 b^3 t \tag{46}$$

$$I_{min} = a_2 b t^3 \tag{47}$$

Součinitelé  $a_{1,2}$  závisí na tvaru použitého profilu [9]. Pro Clark Y platí:

$$a_1 = 0,0418$$

$$a_2 = 0,0454$$

Zavedeme poměrné parametry pro tloušťku, hloubku a poloměr listu:

$$\bar{t} = t/b \quad (48)$$

$$\bar{b} = b/D \quad (49)$$

$$\bar{r} = r/R \quad (50)$$

Elementární kroučící moment od odstředivých sil je dán vztahem:

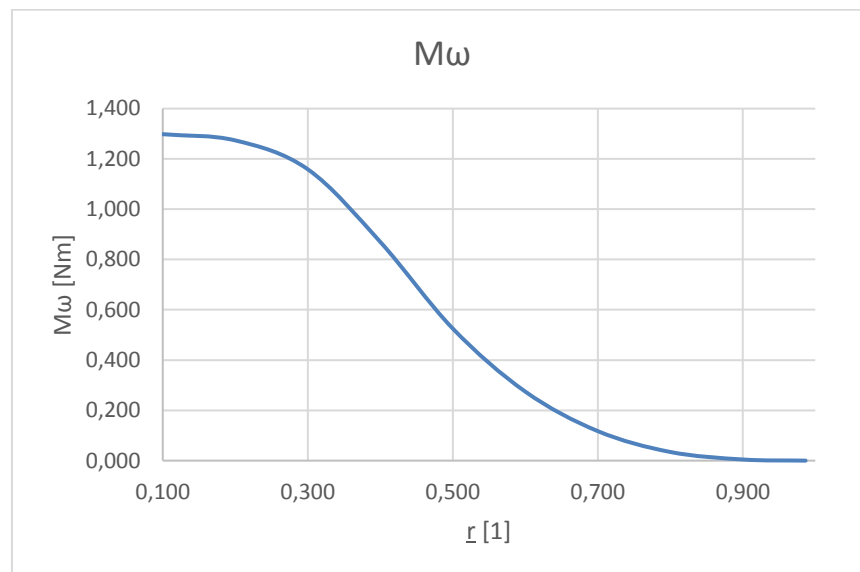
$$dM_\omega = \rho \pi^2 n^2 D^2 \int_0^1 \sin 2\varphi A d\bar{r} \quad (51)$$

Zavedeme parametr  $A$  závislý na geometrii listu:

$$A = (a_1 - a_2 \bar{t}^2) \bar{b}^4 \bar{t} \quad (52)$$

Po numerické integraci je velikost celkového momentu následující:

$$M_\omega = 1,305 Nm$$



Obr. 36 Průběh  $M_\omega$



$r/R$	$\underline{b}$	$\underline{t}$	A	$M\omega$
[1]	[1]	[1]	[1]	[Nm]
0	0,019	0,600	1,85E-09	1,305
0,1	0,019	0,600	1,85E-09	1,293
0,2	0,023	0,350	3,35E-09	1,255
0,3	0,036	0,201	1,37E-08	1,064
0,4	0,043	0,179	2,58E-08	0,678
0,5	0,045	0,120	2,04E-08	0,374
0,6	0,043	0,100	1,39E-08	0,176
0,7	0,038	0,100	8,62E-09	0,060
0,8	0,031	0,100	3,93E-09	0,010
0,9	0,022	0,091	8,74E-10	0,000
0,99	0,007	0,078	7,17E-12	0,000
1	0,000	0,000	0	0,000

*Tab. 5 Hodnoty průběhu  $M\omega$*

## 6 Konstrukční návrh náboje

### 6.1 Návrh a kontrola pohybového šroubu

Rotační pohyb elektromotoru je transformován na axiální prostřednictvím jednochodého šroubu s trapézovým závitem.

Výsledný moment, kterým působí list na natáčecí mechanismus je:

$$M = M_a - M_\omega = 2,637 \text{ Nm} \quad (53)$$

Rameno v uchycení listu, na které bude působit matice pohybového šroubu má poloměr  $r = 15 \text{ mm}$ .

Pro výslednou sílu nutnou vyvodit v axiálním směru tedy platí:

$$Q = 2 \frac{M}{r} = 351,6 \text{ N} \quad (54)$$

Pro střední tlak v trapézových šroubech platí vztah:

$$p = \frac{Q}{z_\xi \pi d_2 H_1} < p_D \quad (55)$$

Z toho vychází vztah pro předběžný střední průměr  $d'_2$

$$d'_2 = \sqrt{\frac{Q}{\pi \psi_H \psi_h p_D}} \quad (56)$$

Součinitel pracovní výšky závitu pro trapézový závit:

$$\psi_H = \frac{H_1}{P} = 0,5 \quad (57)$$

Součinitel výšky matice se volí v rozmezí

$$\psi_h = 1,5 \div 2,5 \quad (58)$$

Dovolený tlak  $p_D$  pro ocelový šroub a bronzovou matici je volen podle následující tabulky [21]:

materiály	$p_D$ [MPa]	f (mazáno)
ocel kalená - bronz	10 ÷ 15	0,06 ÷
ocel - bronz	8 ÷ 10	÷ 0,08
ocel - ocel	7 ÷ 12	0,1 ÷ 0,13
ocel - šedá litina	4 ÷ 6	0,09 ÷ 0,11

Tab. 6 Dovolené hodnoty tlaku [21]

Byla zvolena hodnota

$$p_D = 8 \text{ MPa} \quad (59)$$

A hodnota třecího součinitele  $f$ :

$$f = 0,08 [1] \quad (60)$$

Předběžný minimální střední průměr má tedy hodnotu:

$$d'_2 = \sqrt{\frac{Q}{\pi \psi_H \psi_n p_D}} = \sqrt{\frac{351,6}{\pi \cdot 0,5 \cdot 2 \cdot 8}} = 3,74 \text{ mm} \quad (61)$$

Z konstrukční důvodů, zejména kvůli potřebě připojení pohybového šroubu k hřídeli elektromotoru pohánějícího stavěcí mechanismus, je nutné volit větší rozměry. Ty jsou podle strojírenských tabulek voleny následující:

$d$ [mm]	18	Vnější průměr
$d_2$ [mm]	17	Střední průměr závitu
$d_3$ [mm]	15,5	Průměr jádra
$P$ [mm]	2	Rozteč závitu
$H_1$ [mm]	5,75	Pracovní průměr závitu
$S_3$ [mm <sup>2</sup> ]	188,692	Plocha jádra

Tab. 7 Tabulkové hodnoty pohybového šroubu

### 6.1.1 Pevnostní kontrola na tah a tlak

Součinitel vlivu uložení  $\mu$  má v tomto případě hodnotu

$$\mu = 1 [1] \quad (62)$$

Vzpěrná délka  $L$  odpovídá délce šroubu

$$L = 49,8 \text{ mm} \quad (63)$$

Poloměr setrvačnosti průřezu jádra je dán jako:

$$i_x = \sqrt{\frac{I_{x3}}{S_3}} = \frac{d_3}{4} = 3,875 \text{ mm} \quad (64)$$

Výsledná štíhlost vychází ze vzorce:

$$\lambda = \frac{l_v}{i_x} = \frac{\mu \cdot L}{i_x} = \frac{1 \cdot 40}{1,55} = 32,1 [1] \quad (65)$$

Protože je  $\lambda \leq 40$ , šroub není potřeba kontrolovat na vzpěr [21].

Tlakové napětí v dřívku šroubu je následující:

$$\sigma_d = \frac{Q}{S_3} = \frac{Q}{\frac{\pi d_3^2}{4}} = 1,863 \text{ MPa} \quad (66)$$

Je potřeba také vyšetřit zatížení krutem. Pro úhel stoupání platí:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{i \cdot P}{\pi d_2} \quad (67)$$

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{i \cdot P}{\pi d_2} = \operatorname{arctg} \frac{1 \cdot 1,5}{\pi \cdot 7,25} = 2,145^\circ \quad (68)$$

Úhel boku  $\beta_n$  je vyjádřen jako:

$$\operatorname{tg} \beta_n = \operatorname{tg} \beta \cdot \cos \gamma \quad (69)$$

Pro trapézový závit platí, že:

$$\beta = 15^\circ \quad (70)$$

Potom:

$$\beta_n = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg} \beta \cdot \cos \gamma) = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg} 15 \cdot \cos 2,145) = 14,99^\circ \quad (71)$$

Pro třecí úhel závitu platí:

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{f}{\cos \beta_n} \quad (72)$$

$$\varphi' = \operatorname{arctg} \frac{f}{\cos \beta_n} = \operatorname{arctg} \frac{0,08}{\cos 14,97} = 4,73^\circ \quad (73)$$

Výsledný krouticí moment šroubu je:

$$\begin{aligned} M_{kš} &= Q \frac{d_2}{2} \operatorname{tg}(\gamma + \varphi') = 265,7 \frac{7,25}{2} \operatorname{tg}(3,77 + 4,73) = \\ &= 360,55 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (74)$$

Průřezový modul v krutu je dán vztahem:

$$W_{k3} = \frac{\pi \cdot d_3^3}{16} = \frac{\pi \cdot 15,5^3}{16} = 46,8 \text{ mm}^3 \quad (75)$$

Smykové napětí v dříku je dáno vztahem:

$$\tau_3 = \frac{M_{kš}}{W_{k3}} = \frac{143,97}{46,8} = 0,493 \text{ MPa} \quad (76)$$

Redukované napětí:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_D^2 + \alpha^2 \tau^2} = 2,05 \text{ MPa} \quad (77)$$

Minimální bezpečnost v tlaku podle [21] je  $k_{min} = 1,75$

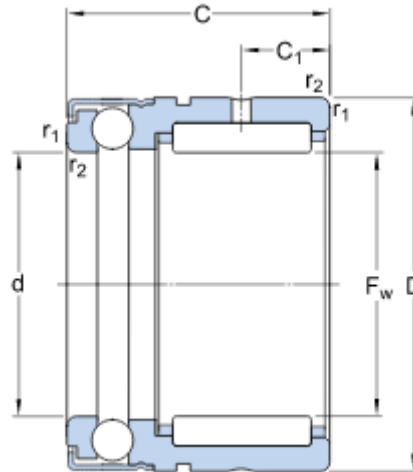
$$k = \frac{\sigma_{kD}}{\sigma_{red}} = 68,3 \geq k_{min} \quad (78)$$

Šroub tedy vyhovuje

Hřídel s trapézovým závitem je na koncích uložena v náboji v kombinovaných ložiskách. Tato ložiska spolehlivě přenáší radiální i axiální zatížení v kombinaci s malými zástavbovými rozměry. Ložisko je radiálně zatíženo vahou mechanismu uchycení listu, které má hmotnost  $m=0,617 \text{ kg}$ . Výsledná radiální síla na jedno ložisko bude tedy:

$$F_r = \frac{m \cdot g}{2} = 0,617 \cdot 9,81/2 = 3,025 \text{ N} \quad (79)$$

V axiálním směru je ložisko zatíženo od silou od natáčecího mechanismu. Tato síla má hodnotu  $F_a = 351,6 \text{ N}$ .



Obr. 37 Kombinované ložisko SKF [22]

Vnější průměr	D=19 mm
Vnitřní průměr	d=10 mm
Šířka	C=18 mm
Základní dynamická únosnost radiální	$C_r=4,95 \text{ kN}$
Základní statická únosnost radiální	$C_{0r}=4,55 \text{ kN}$
Základní dynamická únosnost axiální	$C_a=5,07 \text{ kN}$
Základní statická únosnost axiální	$C_{0a}=8,5 \text{ kN}$

Tab. 8 Parametry kombinovaného ložiska NX 10

Protože se prakticky jedná o dvě spojená ložiska, ekvivalentní dynamické napětí se určuje pro kuličkové a jehlové ložisko zvlášť.

$$F_{r \text{ ekv}} = F_r = 3,025 \text{ N} \quad (80)$$

$$F_{a \text{ ekv}} = F_a = 351,6 \text{ N} \quad (81)$$

Součinitel statické bezpečnosti je určen z:

$$s_{0r} = \frac{C_{0r}}{F_{r \text{ ekv}}} = \frac{4550}{3,025} = 1504 \quad (82)$$

$$s_{0a} = \frac{C_{0a}}{F_{a\text{ ekv}}} = \frac{8500}{351,6} = 24,2 \quad (83)$$

Otáčky elektromotoru jsou  $n = 31,4 \text{ ot/min}$ . Z této hodnoty je určena základní trvanlivost ložisek. Pro kuličkové ložisko platí:

$$L_{r\ 10h} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \left( \frac{C_r}{F_{r\text{ ekv}}} \right)^3 = \frac{10^6}{60 \cdot 31,4} \left( \frac{4950}{3,025} \right)^3 = 2,33 \cdot 10^{12} \text{ hod} \quad (84)$$

Pro jehlové ložisko platí:

$$L_{a\ 10h} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \left( \frac{C_a}{F_{a\text{ ekv}}} \right)^{10/3} = \frac{10^6}{60 \cdot 31,4} \left( \frac{5070}{351,6} \right)^{10/3} = 3873611,6 \text{ hod} \quad (85)$$

Spojení pohybového šroubu s hřídelem 12V elektromotoru je zajištěno pomocí stavěcího šroubu M3.

### 6.1.2 Kinematické poměry

Rychlost nastavení listu je podle podobných systémů zvolena  $\omega = 4 \text{ }^\circ/\text{s}$ .

Klika je ve vzdálenosti  $r = 15 \text{ mm}$  od osy otáčení listu

Axiální rychlost a tedy rychlost posuvu matice bude:

$$v_p = \omega \cdot r = 1,047 \text{ mm/s} \quad (86)$$

Otáčky šroubu jsou dány vztahem:

$$n_{\text{š}} = \frac{v_p \cdot 60}{iP} = 31,416 \text{ 1/min} \quad (87)$$

Pro výpočet výstupního výkonu platí:

$$P_{\text{vyst}} = Q \cdot v_p = 0,368 \text{ W} \quad (88)$$

Účinnost závitové dvojice je:

$$(89)$$

$$\eta_z = \frac{P_{od}}{P_{př}} = \frac{tg\gamma}{tg(\gamma + \varphi')} = 0,310$$

Účinnost ložisek je  $\eta_{lv} = 0,97$

Účinnost závitového mechanismu  $\eta_{\xi}$  a celková účinnost  $\eta_c$  je:

$$\eta_{\xi} = \eta_z \cdot \eta_{lv} = 0,301 \quad (90)$$

$$\eta_c = \eta_{\xi} \cdot \eta_{př} = 0,289 \quad (91)$$

Minimální výkon elektromotoru je tedy:

$$P'_M = \frac{P_{vyst}}{\eta_c} = 1,274 \text{ W} \quad (92)$$

Minimální točivý moment elektromotoru musí být:

$$M_{kM'} = \frac{P'_M}{\omega'_M} = \frac{P'_M \cdot 30}{\pi \cdot n_{\xi}} = 0,387 \text{ Nm} = 3,947 \text{ kg.cm} \quad (93)$$

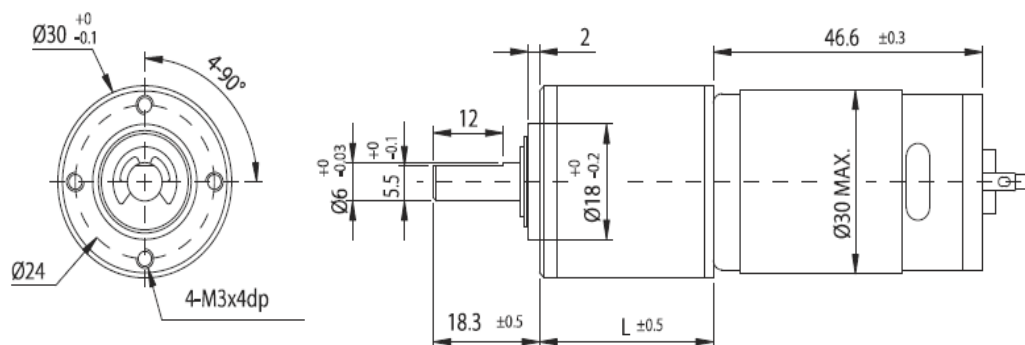
Z požadavku na minimální točivý moment  $M_{kM'}$ , a otáčky šroubu  $n_{\xi}$  byl z katalogu vybrán DC elektromotor s planetovou převodovkou Transmotec PD3046-24-189-BFEC.

Napětí [V]	24
Výkon [W]	7
Jmenovitá rychlost [1/min]	34,5
Jmenovitý moment [kg.cm]	10
Převodový poměr [-]	189:1
Počet převodových stupňů [-]	4





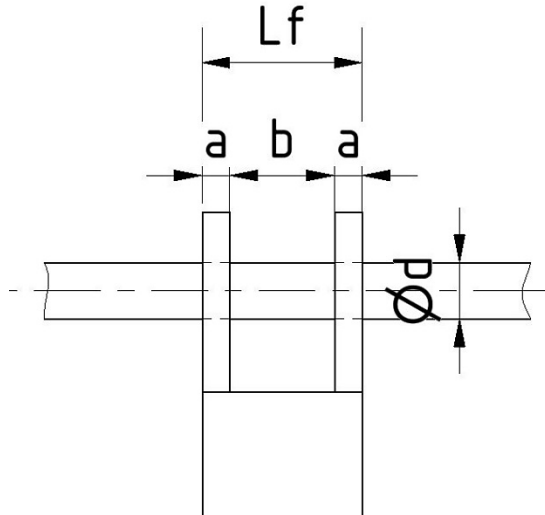
Obr. 38 Transmotec PD3046-24-189-BFEC



Obr. 39 Transmotec PD3046-24-189-BFEC - rozměry

## 6.2 Návrh uchycení listu

Uchycení listu je realizováno lícovaným šroubem tak, aby bylo dosaženo točného rozebíratelného spoje.



Obr. 40 Rozměry čepového spoje

### 6.2.1 Návrh a kontrola na ohyb

Hodnota součinitele bezpečnosti byla zvolena  $k = 2$ . Spoj je namáhán odstředivou silou listu, která má hodnotu  $F_o = 4632,8 \text{ N}$

Mez kluzu oceli třídy 8.8, ze které je šroub vyroben, má hodnotu  $\sigma_{kt} = 640 \text{ MPa}$ .

Pevnostní podmínka je:

$$\sigma_o \leq \sigma_{oD} \quad (94)$$

Dovolené napětí v ohybu vychází ze vztahu:

$$\sigma_{oD} = \frac{\sigma_{kt}}{k} = \frac{640}{2} = 320 \text{ MPa} \quad (95)$$

Pro ohybové napětí platí:

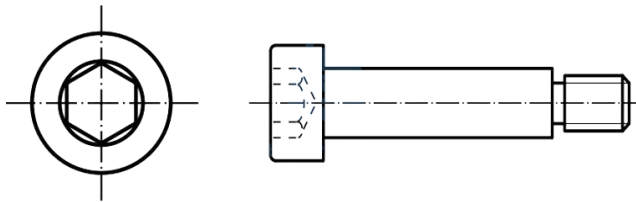
$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{F(2a + b)}{8 \frac{\pi d^3}{32}} = \frac{4F(2a + b)}{\pi d^3} \quad (96)$$

Rozměr  $b = 18,7 \text{ mm}$  je dán konstrukcí kořene listu. Rozměr  $a = 5 \text{ mm}$  je volen s ohledem na výsledný průměr šroubu.

Návrhový průměr šroubu je:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{4F(b + 2a)}{\pi\sigma_{oD}}} = 8,1 \text{ mm} \quad (97)$$

Z tabulek byl vybrán lícovaný šroub s vnitřním šestihranem M8x90 podle DIN ISO 7379



Obr. 41 Lícovaný šroub

Je provedena kontrola ohybového napětí:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{4F(2a + b)}{\pi D^3} = 232,2 \text{ MPa} < \sigma_{Do} \quad (98)$$

Zvolený šroub tedy vyhovuje

### 6.2.2 Kontrola na smyk

Hodnota dovoleného napětí ve smyku vychází z dovoleného napětí v ohybu. Pro oceli platí:

$$\tau_D = 0,6 \cdot \sigma_{Do} = 192 \text{ MPa} \quad (99)$$

Smykové napětí se vypočte ze vztahu

$$\tau = \frac{2F_o}{\pi D^2} = 29,5 \text{ MPa} \quad (100)$$

Musí být splněna následující podmínka:

$$\tau \leq \tau_D \quad (101)$$

Šroub při namáhání na smyk vyhovuje.

### 6.2.3 *Kontrola tlaku v listu*

V otvoru pro uchycení listu je ocelová vložka z ČSN 11 500 pro kterou je doporučená hodnota  $p_{1D} = 100 \text{ MPa}$  [21]

$$p_1 = \frac{F_o}{D \cdot b} = 24,8 \text{ MPa} \leq p_{1D} \quad (102)$$

### 6.2.4 *Kontrola tlaku v táhle*

Táhlo s otočným čepem je vyrobeno z duralu pro který je minimální doporučená hodnota  $p_{2D} = 80 \text{ MPa}$

$$p_2 = \frac{F_o}{2 \cdot D \cdot a} = 51,5 \text{ MPa} \leq p_{2D} \quad (103)$$

### 6.3 Návrh vratné pružiny listu

Aby listy vrtule při vypnutém motoru volně nevisely a nevytvářely zbytečný aerodynamický odpor, jsou spojeny s nábojem zkrutnou pružinou. Její účel je tedy držet listy rovnoběžně s osou náboje a při rotaci dovolit jejich roztažení odstředivou silou do pracovní polohy.

Pružina je předepjatá na zatížení, které bude vyvozovat volně zavěšený list. Tento moment má hodnotu

$$M_l = 1,07 Nm \quad (104)$$

Protože se pružina skládá ze dvou zkrutných pružin v paralelním zapojení, moment působící na jednu pružinu je:

$$M_{l/2} = M_l/2 = 0,535 Nm \quad (105)$$

Z nezatíženého stavu do stavu předepjatého (poloha složené ho listu) se pružina dostane deformací o úhel :

$$\varphi_1 = 40^\circ \quad (106)$$

Momentová tuhost pružiny bude:

$$k = \frac{M_{l/2}}{\varphi_1} = 0,013 \frac{Nm}{^\circ} \quad (107)$$

Při narovnání listu vlivem odstředivých sil dojde k deformaci o úhel:

$$\varphi_8 = 90^\circ \quad (108)$$

Při této výchylce bude pružina působit momentem:

$$M_8 = k \cdot \varphi_8 = 3,64 Nm \quad (109)$$

Byly navrženy tyto rozměry pružiny:

Vnitřní průměr	$D_2=30 \text{ mm}$
Vnější průměr	$D_1=35,6 \text{ mm}$
Průměr drátu	$d=2,8 \text{ mm}$
Střední průměr	$D=32,8 \text{ mm}$
Délka pracovního ramena	$R_1=40 \text{ mm}$
Délka opěrného ramena	$R_2=10 \text{ mm}$

Tab. 9 Rozměry torzní pružiny

Pro počet činných závitů platí vztah:

$$n' = \frac{\pi \cdot E \cdot d^4}{64 \cdot 180 \cdot k \cdot D} = 6,849 \quad (110)$$

Tuto hodnotu je potřeba zaokrouhlit na celý počet činných závitů na polovině pružiny, tedy:

$$n = 7 \quad (111)$$

Celkový počet závitů je:

$$n_c = n + 2 = 9 \quad (112)$$

Při ohybu pružiny dochází ke zmenšování průměru. Střední průměr při maximálním zatížení bude:

$$D' = \frac{D \cdot n}{n + \alpha/360} = \frac{13 \cdot 2}{2 + 105/360} = 31,19 \text{ mm} \quad (113)$$

Je potřeba zkontrolovat ohybové napětí v drátu. Pružina je bude vyrobena ze drátu z nerezové oceli, která má modul pružnosti ve smyku  $G = 69000 \text{ MPa}$

Modul pružnosti v tahu je vypočten ze vztahu:

$$E = 2G(1 + \mu) = 2 \cdot 69000 \cdot (1 + 0,3) = 179400 \text{ MPa} \quad (114)$$

Korekční součinitel napětí v ohybu:

$$K_b = \frac{4 \cdot c - 1}{4 \cdot c - 4} = 1,07 \quad (115)$$

Kde  $c$  je poměr vinutí:

$$c = \frac{D}{d} = 11,7 \quad (116)$$

Napětí materiálu pružiny v ohybu při maximálním zatížení je potom:

$$\sigma = K_b \frac{32 \cdot M_g}{\pi \cdot d^3} = 863,948 \text{ MPa} \quad (117)$$

Pevnost v tahu ocelového drátu je

$$\sigma_{pt} = 1350 \text{ MPa} \quad (118)$$

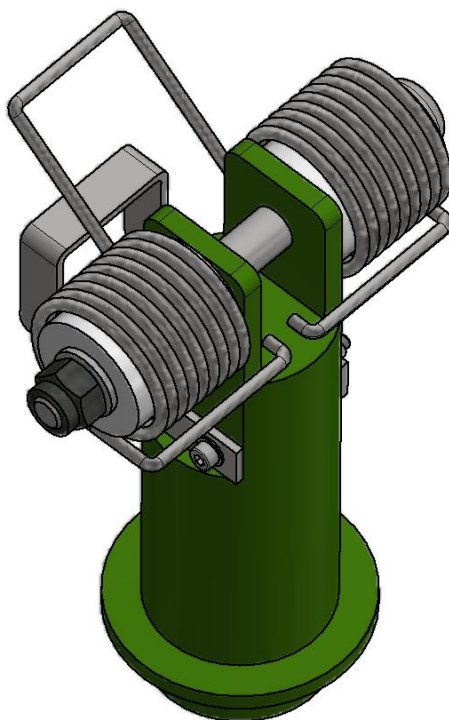
Pro tento případ byl zvolen součinitel bezpečnosti  $k = 1,5$

Dovolené napětí bude:

$$\sigma_D = \frac{\sigma_{pt}}{k} = 900 \text{ MPa} \quad (119)$$

Dovolené napětí je vyšší než napětí v pružině a tak vyhovuje.

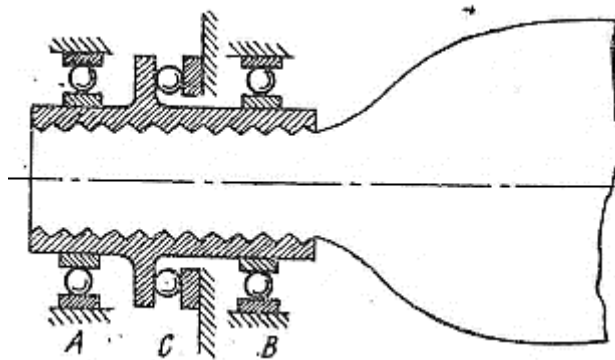
Pružina opěrnými konci přiléhá na otočný čep. Prostor mezi vnitřním průměrem a lícovaným šroubem je vymezen hliníkovými válečky.



Obr. 42 Sklápěcí mechanismus

## 6.4 Uložení otočného čepu v náboji

Čep ke kterému je připevněn list, musí být v náboji připojen způsobem, který dovoluje rotační pohyb kolem osy listu pro změnu úhlu nastavení. Zároveň musí také bezpečně přenášet odstředivou sílu listů a ohybový moment od tahu. Odstředivá síla se zachycuje axiálním ložiskem, často válečkovým. Radiální síly (A, B) se zachycují kuličkovými ložisky. Protože je při rotaci vrtule nejdominantnější odstředivá síla ve směru osy listu, radiální valivá ložiska je možné nahradit ložisky kluznými.



Obr. 43 Uložení listu třemi ložisky [9]

Pro případ uložení hřídele v náboji, kterým se tato práce zabývá, bylo pro přenos axiální a radiálních sil zvoleno kombinované ložisko NKX 40. Radiální síly se budou projevovat především při letu se sklopenými listy. Proti vniknutí nečistot je na hřídeli nasazen O-kroužek 40x3,55.



Obr. 44 Kombinované jehlové a kuličkové ložisko [4]



Vnější průměr	D=52 mm
Vnitřní průměr	d=40 mm
Šířka	B=32 mm
Základní dynamická únosnost radiální	$C_r=26,4$ kN
Základní statická únosnost radiální	$C_{0r}=51$ kN
Základní dynamická únosnost axiální	$C_a=27$ kN
Základní statická únosnost axiální	$C_{0a}=68$ kN

Tab. 10 Parametry ložiska NX40

Ložisko pracuje při velmi nízkých otáčkách, proto je voleno na základě statického zatížení. Zatížení v radiálním a axiálním směru musí být přepočteno na ekvivalentní zatížení. Pro axiální kuličkové ložisko je ekvivalentní zatížení rovno odstředivé síle, kterou vytváří list a sestava součástí zajišťující uchycení listu (pružina, šroub, čep...). Hmotnost mechanismu  $m_{mech} = 0,617$  kg a jeho těžiště  $r_T = 0,08$  m bylo určeno z CAD modelu.

$$\begin{aligned}
 F_{o\ mech} &= \left(\frac{\pi \cdot n}{30}\right)^2 \cdot m_{mech} \cdot r_T \\
 &= \left(\frac{\pi \cdot 2000}{30}\right)^2 \cdot 0,617 \cdot 0,08 = 2165\ N
 \end{aligned}
 \tag{120}$$

$$P_0 = F_a = F_{o\ list} + F_{o\ \check{c}ep} = 4632 + 2165 = 6797\ N \tag{121}$$

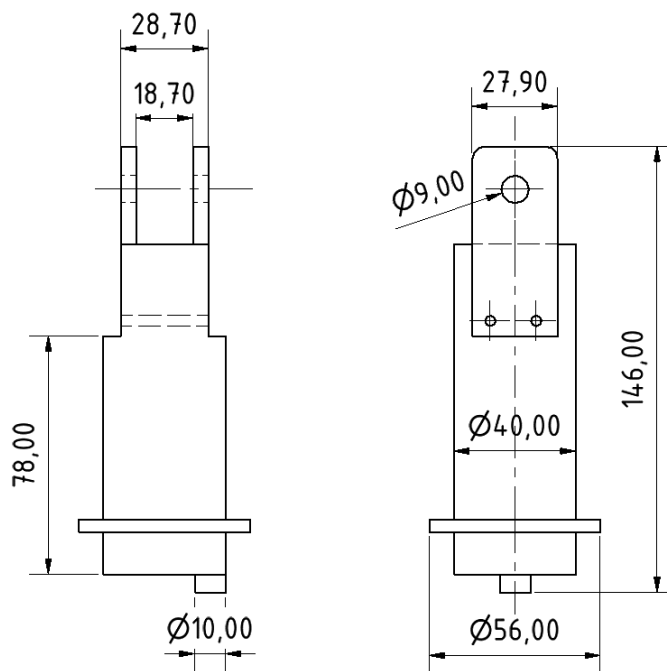
$$P_0 < C_{0a}$$

Výsledná statická únosnost je:

$$s_0 = \frac{C_0}{F_0} = 10 \tag{122}$$

Tato hodnota únosnosti vyhovuje.

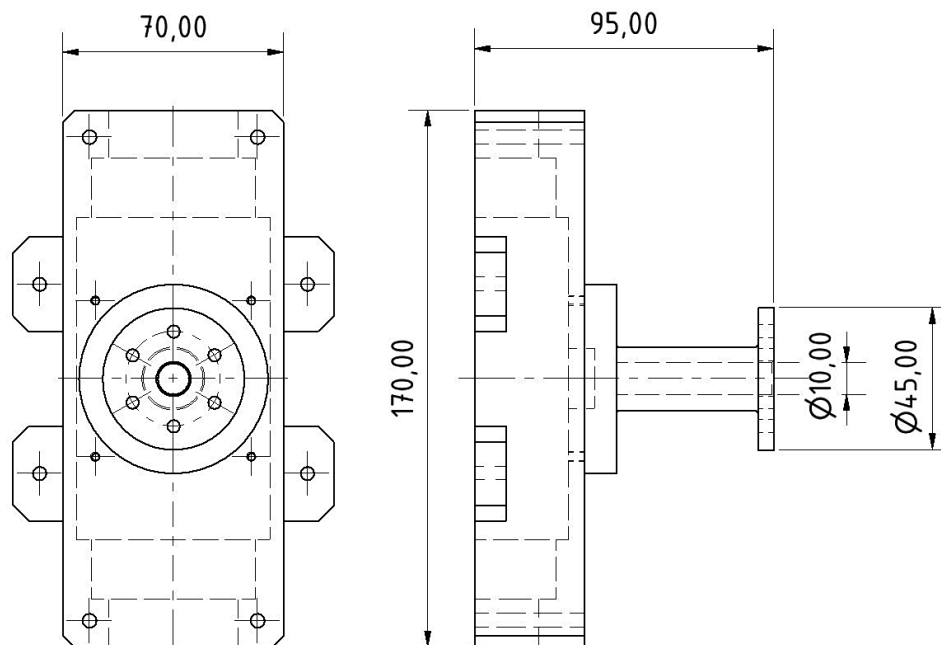
Samotný otočný čep je vyrobený ze slitiny EN AW-2024 - Dural. Tato slitina zajišťuje dostatečnou pevnost, obrobiteľnosť a ochranu proti korozi. Kromě uchycení listu konstrukce umožňuje připevnění opěrky listu a tvoří oporu opěrnému ramenu torzní pružiny.



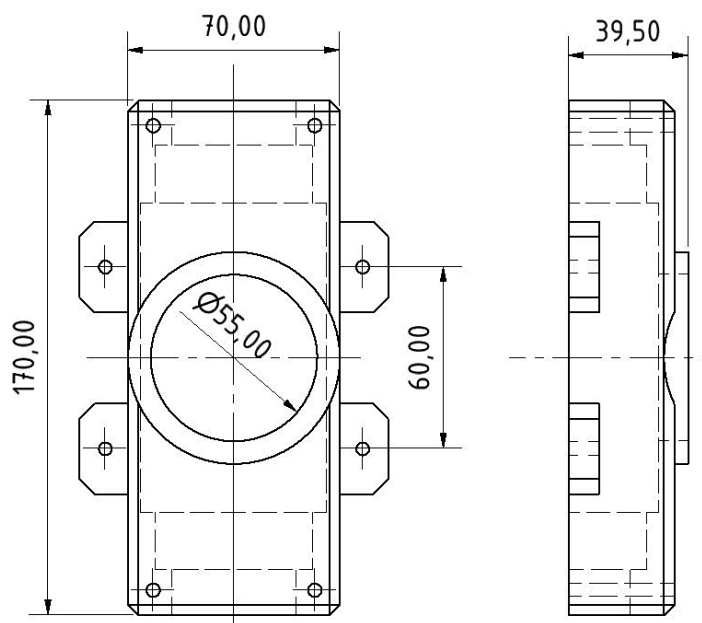
Obr. 45 Otočný čep

## 6.5 Skříň náboje

Skříň náboje je dělená na dvě části, což usnadňuje montáž celkové sestavy. Obě části jsou obrobena z duralu. Na zadní části se nachází příruba pro připojení k hnacímu elektromotoru.



Obr. 46 Část náboje s přírubou



Obr. 47 Přední část

### 6.5.1 Kontrola tlaku v závitech víka

Na víku je uchycena konstrukce, která drží 12V elektromotor a plošinku s mikrospínači. Zároveň je v něm uloženo ložisko, a tak je zevnitř zatěžováno silou od natáčecího mechanismu. Víko je uchyceno šesti šrouby DIN 84 M3x12 zajištěných proti uvolnění pružnou podložkou. Závity jsou v duralovém těle náboje. Jejich doporučená délka je 8 mm.

Pro závit M3 platí hodnoty:  $d = 3 \text{ mm}$ ,  $d_2 = 2,675 \text{ mm}$ ,  $D_1 = 2,459 \text{ mm}$

Doporučená hodnota tlaku v závitech hliníkových slitin je  $p_{Dz} = 60 \text{ MPa}$

Podmínka otláčení v závitu je:

$$p = \frac{F_i}{S_p} \leq p_{Dz} \quad (123)$$

Otláčená plocha závitů:

$$\begin{aligned} S_p &= \pi \cdot d_2 \cdot H_1 = \pi \cdot d_2 \cdot \frac{d - D_1}{2} \cdot z = \\ &= \pi \cdot 2,675 \cdot \frac{3 - 2,459}{2} \cdot 12 = 27,28 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (124)$$

Síla působící na jeden šroub je:

$$F_i = \frac{Q}{6} = \frac{351,6}{6} = 58,6 \text{ N} \quad (125)$$

Výsledný tlak:

$$p = \frac{F_i}{S_p} = 2,15 \text{ MPa} \leq p_{Dz} \quad (126)$$

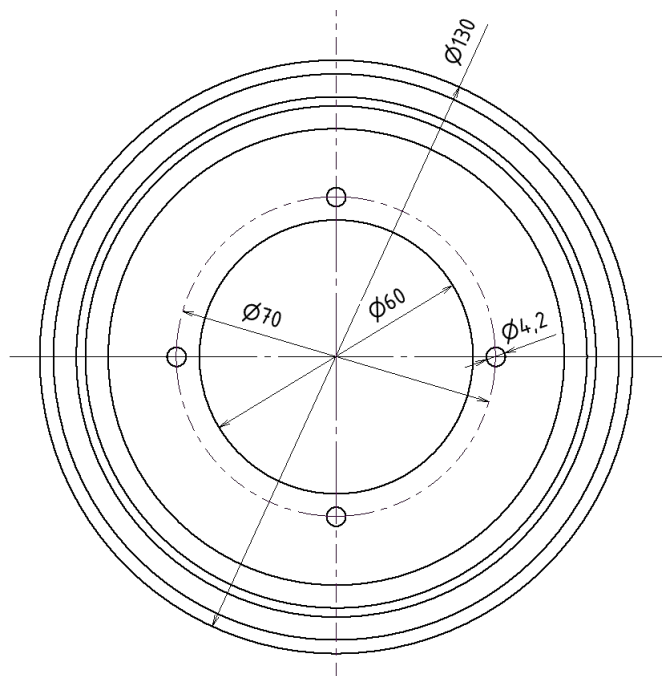
Kontrola statického tahového napětí:

$$\sigma = \frac{F_i}{S_3} = \frac{F_i \cdot 4}{\pi \cdot d_3^2} = \frac{58,6 \cdot 4}{\pi \cdot 2,387^2} = 13,1 \text{ MPa} \quad (127)$$

$$\sigma_D = \frac{R_e}{k} = \frac{320}{2} = 160 \text{ MPa} \geq 13,1 \text{ MPa} \quad (128)$$

## 6.6 Elektrická instalace

### 6.6.1 Sběrná deska



Obr. 48 Sběrná deska

Přenos elektrické energie z letounu do náboje vrtule je realizován kotoučovou sběrnou dráhou. Jedná se o desku plošných spojů se dvěma drahami z pozlacených

kontaktů. Deska má tloušťku  $t=1,5\text{ mm}$  a vnější průměr  $d=130\text{ mm}$ . Ke konstrukci náboje je připevněna čtyřmi šrouby M4, které jsou proti pootočení zajištěny pružnou podložkou. Sběrná hlava nehybně spojená s konstrukcí draku (statorová část), na vodivé kontakty doléhají sběrné kartáče.

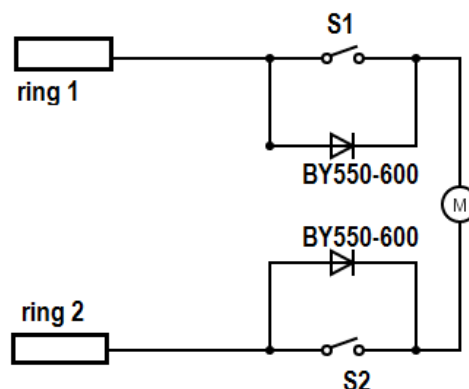
### 6.6.2 Jištění dorazů krajních poloh úhlu nastavení

Při dosažení krajních poloh úhlu nastavení listu je nutné, aby stavěcí mechanismus byl vybaven spolehlivým systémem pro včasné zastavení motoru, který tento mechanismus pohání. Zároveň by měl být zálohován, a to nejlépe mechanicky.

Dorazy jsou jištěny:

- a) Elektricky – při dosažení krajní polohy je sepnut mikrospínač, který přeruší elektrický obvod k elektromotoru.
- b) Mechanicky – v případě selhání elektrického systému jsou na hřídeli s pohybovým šroubem nasazeny kroužky zabraňující matici v dalším pohybu.

Byl navržen odvod se dvěma mikrospínači SM-05S-06P0-Z a dvěma diodami BY550-600. Tento obvod umožňuje, že se po dosažení krajní polohy, a tedy rozepnutí mikrospínače přeruší a motor tak zastaví. Díky usměrňovacím diodám je však umožněna práce motoru při přepólování (nastavení na opačné otáčky). Obvod je tak vždy přerušen jen v jednom směru. Při poruše systému koncových spínačů se matice zastaví na mechanických dorazech. Výrobce udává životnost mikrospínače je 10 000 000 cyklů. Konstrukce umožňuje změnu rozsahů nastavení listu, pokud by se například v praxi ukázalo stávající nastavení nedostatečné.



Obr. 49 Elektrický obvod v náboji



## 7 Závěr

Zaměřením této práce bylo navržení konstrukce náboje stavitelné sklopné vrtule pro elektromotor o výkonu do 25 kW. V úvodu byla zpracována rešerše používaných systémů sklápění a nastavování listů na určitý úhel náběhu. Problematika byla uvedena také základním rozdělením principů a konstrukčních řešení. Následující partie se zabývala určením zatížení, které za letu přenáší listy vrtule do samotného náboje. Tak byla určena odstředivá síla, aerodynamický ohybový moment a aerodynamický krouticí moment a moment od odstředivých sil. Tyto síly a momenty byly poté využity k dimenzování stavěcího a sklopného mechanismu. Sklápění listů je řešeno jako čepový spoj s lícovaným šroubem. Tento čep byl zkontrolován na ohyb a smyk. Ve stykových plochách bylo ověřeno, že nebude docházet k otlacení materiálu. Pro udržení listů ve sklopené poloze byla navržena a zkontrolována dvojzkrutná pružina. Mechanismus nastavování úhlu listů je založen na použití pohybového šroubu s bronzovou maticí, která tlačí na excentricky umístěný výběžek na čepu, ke kterému je připevněn list. Pohybový šroub byl pevnostně zkontrolován. Převážná část náboje je vyrobena z duralu 2024-T3. Celková hmotnost unašeče je 3,5 kg. Šroubové spoje byly v osové směru zkontrolovány na sílu od stavěcího mechanismu. V programu Autodesk Inventor byl vytvořen model a výkres sestavy.

# Literatura

- [1.] Constant-speed props. *AVweb*. [Online] [Citace: 9. 8 2019.]  
<https://www.avweb.com/ownership/constant-speed-props/>.
- [2]. Robert L. Cameron, Donald W. Cameron. *Folding Propeller*. 2369276 USA, 13. Únor 1945.
- [3]. Brandon L. Litherland, Michael D. Patterson, Joseph M. Derlaga, Nicholas K. Borer. *Method for Designing Conforming Folding Propellers*. Hampton, USA : NASA Langley Research Center.
- [4]. Folding Propeller W/Hub 45mm/4mm Shaft 9x6 (2pcs). *HobbyKing*. [Online] [Citace: 5. Březen 2019.] [https://hobbyking.com/cz\\_cz/folding-propeller-w-hub-45mm-4mm-shaft-9x6-2pcs.html?\\_\\_store=cz\\_cz](https://hobbyking.com/cz_cz/folding-propeller-w-hub-45mm-4mm-shaft-9x6-2pcs.html?__store=cz_cz).
- [5]. Icaro 2000. [Online] [Citace: 3. 7 2019.]  
<https://www.icaro2000.com/Products/Trike/Trike.htm>.
- [6]. Motor. *B13 Electric*. [Online] [Citace: 25. 7 2019.] <https://b13e.akaflieg-berlin.de/>.
- [7]. Goldstein, Ryan. *Self-folding propeller*. US20180257769A1 United States, 13. 9 2019.
- [8]. Kapeter, Luka. *Propeller-hub assembly with folding blades for vtol aircraft*. WO2017208037A1 2017.
- [9]. Alexandrov, V. L. *Letecké vrtule*. Praha : SNTL, 1954.
- [10]. An Incomplete History of the Hamilton Standart Superhydromatic Propeller. *Engine history*. [Online] [Citace: 1. 3 2019.]  
[www.enginehistory.org/Propellers/HamStdSH/HamStdSH01.shtml](http://www.enginehistory.org/Propellers/HamStdSH/HamStdSH01.shtml).
- [11]. *Engine History*. [Online] [Citace: 20. 3 2019.]  
<https://www.enginehistory.org/Propellers/HamStd/hamstd.shtml>.
- [12]. Ovládání vrtulí do kabiny letounu / Páka hydraulického ovládání vrtule. *Kašpar a synové*. [Online] [Citace: 10. červen 2019.]  
[http://www.kasparaero.cz/product/54/paka\\_hydraulickeho\\_ovladani\\_vrtule.html](http://www.kasparaero.cz/product/54/paka_hydraulickeho_ovladani_vrtule.html).



- [13]. Uživatelská příručka, Elektricky stavitelná vrtule SR 3000. *Woodcomp*. [Online] [Citace: 5. března 2019.] <http://www.woodcomp.cz/wp-content/uploads/2016/09/sr3000rev.h-cz.pdf>.
- [14]. Ivo story. *Ivo propeller*. [Online] [Citace: 10. března 2019.] <http://www.ivoprop.com/ivostory>.
- [15]. Propeller Stories. *Engine History*. [Online] [Citace: 6. 5 2019.] <http://www.enginehistory.org/Propellers/propstories/propstories.shtml>.
- [16]. 120100/S Sensored Outrunner brushless motor 50KV 25000W. *Alien Power Systems*. [Online] [Citace: 3. 3 2019.] <https://alienpowersystem.com/shop/brushless-motors/120100s-sensored-outrunner-brushless-motor-50kv-25000w/>.
- [17]. Propeller. *CFI Notebook*. [Online] [Citace: 3. 8 2019.] <https://www.cfinotebook.net/notebook/operation-of-aircraft-systems/propeller>.
- [18]. Lipš, Ondřej. *Návrh vrtule pro nízká Reynoldsova čísla, bakalářská práce*. Praha : ČVUT, 2019.
- [19]. Předpis UL-2. místo neznámé : LAA ČR, 2019.
- [20]. Amatt, W., Bates, H. E. a Borst, H. V. *Summary of propeller design procedures and data, Volume II*. Rosemont : U.S. Army Air Mobility Research and Development Laboratory, 1973.
- [21]. Švec, Vladimír. *Části a mechanismy strojů: příklady*. Praha : Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-04137-6.
- [22]. Jehlová ložiska/axiální ložiska. *SKF*. [Online] [Citace: 20. červenec 2019.] <https://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/roller-bearings/needle-roller-bearings/combined-needle-roller-bearings/needle-roller-thrust-rolling-bearings>.
- [23]. Mikrospínač ZIPPY SM-05S-06P0-Z. *GM Electronic*. [Online] [Citace: 24. červenec 2019.] [www.gme.cz/mikrospinac-zippy-sm-05s-06p0-z](http://www.gme.cz/mikrospinac-zippy-sm-05s-06p0-z).
- [24]. *Engine history*. [Online] [Citace: 8. 3 2019.] [www.enginehistory.org/Propellers/HamStd/hamstd.shtml](http://www.enginehistory.org/Propellers/HamStd/hamstd.shtml).
- [25]. Carat A. *Pilotmix*. [Online] [Citace: 6. 7 2019.] <https://www.pilotmix.com/carat-a>.

# **Přílohy**