



KONCEPT VRTUĽOVÉHO PROPULZORA PRE ŠIROKÝ ROZSAH RÝCHLOSTI LETU

Jakub Ivan
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Jozef Čerňan
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This thesis is focused on creation of propeller concept for wide range of flight speed. The part, which is discussed in the thesis is creation of design for blade motion mechanization, that can reach variable diameters. Apart of creation of this design, the thesis offers historic overview of propeller development throughout the years. Mechanization is designed in 3D environment. The software used for design is Autodesk Inventor. Design isn't calculated of given engine. The outcome of this thesis is to give perspective for constructors, whoever would want to construct this idea in reality, not 3D environment only. The design in 3D environment is working as it should and when motion is launched, blades are really changing the diameter. In the design study, radius difference between extended and reduced blades is more than 300 millimeters. Design complies with the task.

Keywords

propeller, blade, diameter, difference, design, mechanization.

1. Úvod

Táto štúdia sa zameriava na vytvorenie 3D modelu konceptu vrtuľového propulzora, pre široký rozsah rýchlosti letu. Vytvorenie takéhoto mechanizmu by umožňoval využívať plný potenciál leteckých motorov, ktoré slúžia na vytvorenie mechanickej energie pre vrtuľu, ktorá túto energiu premieňa na kinetickú. Tým, že by sme využívali plný potenciál motorov, dokázali by sme dosahovať väčších maximálnych rýchlostí, ako pri použití konvenčnej vrtule.

Princíp spočíva v tom, že by sme menili priemer vrtule. Zabezpečili by sme to sklápaním alebo vyklápaním listov. Tým by sme dosiahli to, že by sme vedeli vrtuľu roztáčať na vyššie otáčky za minútu, ako pri jednom danom priemere bez toho, aby sa na hrotoch listov vytvorilo kritické Machové číslo. Hodnota rýchlosti, kedy hroty listov dosahujú M_{krit} sa vzťahuje na obvodovú rýchlosť otáčania vrtule.

Kritické machové číslo spôsobuje zmenu obtekania vzduchu vrtule. Menia sa fyzikálne zákony klasického obtekania. Ak hrot listu dosiahne hodnotu M_{krit} , vzduch, ktorý sa ma urýchliť na tomto mieste začína stagnovať až po bod, kedy vzduch začne byť stacionárny a nebude sa urýchľovať. Taktiež pri M_{krit} sa rapídne zväčšuje úroveň hluku. Ak by sme pri otáčkach, kedy vrtuľa dosahuje M_{krit} zmenšili jej priemer, zmenšili by sme obvodovú rýchlosť a tým pádom by sme dokázali roztáčať vrtuľu na vyššie otáčky.

Takáto inovácia vychádza z historických a aj teoretických poznatkov. Potreba výskumu takéhoto konceptu je prirodzená. Z histórie vieme, že vývoj vrtúľ závisel od požiadaviek či už vojenského, alebo civilného letectva. Bola potreba dosahovať také výkony, aby lietadlá, ktoré napríklad zväčšovali letecké súboje, mali navrch nad nepriateľskými lietadlami. Preto sa v štúdií musí spomenúť aj historický vývoj, aby sa pochopila potreba konceptu.

2. História

Prvá zmienka o vrtuli siaha až do roku 320 v našom letopočte, kedy sa z bambusu vytvorila hračka, ktorá mala vlastnosti podobné dnešným helikoptéram. Ak človek roztočil listy, hračka sa dokázala udržať aj so svojím telom vo vzduchu.

V období renesancie, v Taliansku, Leonardo Da Vinci nakreslil návrh propulzora, ktorej vrtuľa bola inšpirovaná Archimedovou skrutkou, ktorá slúžila na prečerpávanie vody z kanálov. Študentovi z Marylandskej Univerzity Austinovi Perthemu sa podarilo skonštruovať Da Vinciho návrh s tým, že skrutky mali obojstranné nábežné hrany. Tieto skrutky nainštaloval na UAS. Skrutky dokázali vytvoriť dostatočný vztlak, aby dostali konštrukciu UAS do vzduchu, a taktiež Perthe mal plnú kontrolu nad ovládaním UAS.

2.1. Obdobie pred prvou svetovou vojnou

V roku 1852, ako prvý krát použil vrtuľový propulzor na pohyb vo vzduchu Henri Giffard na vzducholodi. Vrtuľa mala priemer 3,35 metra a maximálna rýchlosť vzducholode bola 10 km/h.

Najväčší míľnik zaznamenali bratia Wrightovci v roku 1903, keď so svojim lietadlom Flyer uskutočnili prvý človekom kontrolovaný let na svete. Flyer mal dve vrtule, ktoré boli poháňané z jedného motora o síle 12 koní. Čarom tohto letu bola vrtuľa. Už pred tým ako vzlietol Flyer boli pokusy o prvý let riadený človekom. Napríklad Samuel Langley sa pokúšal vzlietnuť už pred Wrightovcami, avšak jeho vrtuľa nebola dobrej koncepcie a nedokázala vytvoriť takú kinetickú energiu, aby dokázala vyniesť lietadlo do vzduchu. Jeho vrtuľa sa skladala z dvoch tyčí, na ktorých koncoch bola látka do lopatkového tvaru. Wrightovci, na rozdiel od Langleyho, vytvorili pevnú vrtuľu, ktorej charakteristiky boli testované v ich vlastnom veterom tuneli. Vrtuľa bola ľahká a pevná. Bola z dreva. Jej tvar zabezpečoval, že dokázala vytvárať dostatočnú kinetickú energiu na let.

2.2. Obdobie prvej svetovej vojny

V období prvej svetovej vojny bolo dbané na to, aby mali vrtule také skrútenie, hrúbku profilu a tvar profilu, aby bola ich efektívnosť a využitie motora čo najväčšia. Pevné vrtule sa vyrábali a navrhovali na výpočtové režimy podľa toho, na čo bolo dané lietadlo využívané. Takisto bol rozdiel v spojeneckých doktrínach a v doktrínach osi. Zatiaľ čo moci osi navrhovali vrtule tak, aby lietadlo dosahovalo väčšiu rýchlosť stúpania, spojenecké mocnosti navrhovali vrtuľu tak, aby lietadlo dosahovalo najväčšiu rýchlosť v horizontálnom lete. Tu vznikla potreba variability nastavenia vrtule počas letu. Takisto kvôli väčším výkonom z motorov, bola potreba o zmenu materiálu používaného na konštrukciu vrtúľ.

2.3. Medzivojnové obdobie

V medzivojnovom období sa letecká vrtuľa začala vyrábať aj z iných materiálov než drevo. Začali sa využívať materiály ako dural, kov a Micarta. Tým, že bola vrtuľa vyrábaná z pevnejších materiálov, dokázala preniesť viac otáčok bez toho, aby vznikli trhliny alebo aby sa rozpadla. Takisto nové materiály umožnili tvarovať vrtuľu do takej miery, že jej profil mohol byť oveľa tenší, viac skrútený a viac tvarovaný.

Okrem materiálu sa inovovala aj vo variabilite. Vznikli prvé vrtule s nastaviteľným uhlom listov na zemi. Bol to primitívny systém, kedy pilot pred letom, podľa toho aký chcel mať režim vrtule, si manuálne nastavil uhol listov. Tento typ vrtule malo lietadlo Spirit of Saint Louis, na ktorom Charles Lindbergh, ako prvý pilot preletel trasu New York – Paríž.

Ku začiatku druhej svetovej vojny vznikala potreba vylepšiť zmenu uhlu nastavenia listov a to tak, aby ho dokázal pilot meniť vo vzduchu. Najprv sa do lietadiel implementoval systém s manuálnym ovládaním, kedy pilot okrem nastavovania výkonu motora, nastavoval aj uhol nastavenia listov. Toto bolo veľmi nepraktické v boji, keďže sa pilot, okrem pilotovania, sústredil aj na správne nastavenie uhla listov, aby nepreťažil vrtuľu a aby dosiahol čo najväčšiu efektívnosť.

Postupne sa začal vyvíjať odstredivý regulátor na ovládanie synchronizácie otáčok motora s vrtuľou. Tento systém uľahčil prácu pilotom, lebo sa mohli plne sústrediť na pilotáž, alebo na letecký súboj.

2.4. Druhá svetová vojna a súčasnosť

Počas druhej svetovej vojny sa konštruktéri snažili navrhovať vrtule tak, aby boli variabilné pre rôzne fázy letu a aby dokázali prenášať mechanickú energiu z motora na vrtuľu. Pohonné jednotky v tej dobe však dosahovali také výkony, že samotná vrtuľa nestačila. Preto po druhej svetovej vojne vznikali napríklad protichodne otáčajúce sa vrtule, alebo vrtule, ktoré by mali efektívnosť aj pri vysokých otáčkach. Príkladom takého lietadla je McDonnell XF – 88B alebo XF – 84H. Koncept nadzvukových vrtúľ sa však neuchytil. Preto sme doteraz limitovaný maximálnymi otáčkami vrtule pod hranicu machového kritického čísla, ktoré vzniká na hrotoch listov vrtule z dôvodu vysokých otáčok, ktoré majú za následok vysokú obvodovú rýchlosť vrtúľ.

3. Metodika a metódy skúmania

Pri tejto štúdií sa metodika rozdeľuje do troch častí. Teoretická časť, v ktorej sa porovnávajú už dané poznatky a z ktorej sa pri navrhovaní berie inšpirácia, dizajnová časť, kde sa sústava modeluje v programe Autodesk Inventor a návrhová časť, kde sa riešia konštrukčné otázky na danú sústavu.

3.1. Teoretická časť

Teoretická časť sa sústreďuje hlavne na zber dát a poznatkov. Informácie sa čerpajú z akademických zdrojov, webových stránok alebo kníh, ktoré korešpondujú s akademickými poznatkami. Zdroje, ktoré sú neoverené na stránkach sa ešte dodatočne overili v akademických literatúrach preto, aby neboli do štúdie spísané zavádzajúce informácie.

3.2. Dizajnová časť

Prostredie, v ktorej sa sústava a súčiastky modelovali je softvér Autodesk Inventor. Prenášala sa tam vízia, ktorá vznikla vďaka teoretickým poznatkom. Riešenia daných súčiastok a ich uložení boli navrhované tak, aby sa zaistila jednoduchosť celého mechanizmu. Čím komplikovanejšia sústava by vznikla, tým náročnejšie by to bolo udržiavať a financovať.

3.3. Návrhová časť

V návrhovej časti sa riešili konštrukčné otázky, zachovanie materiálu súčiastok, pohybové vlastnosti a dodatočné riešenia potencionálnych problémov, ktoré by sa pri konštruovaní objavili. Takisto sa spísali návrhy, či už na spájanie súčiastok alebo ich mazanie. Podstatnou otázkou, ktorou sa zaoberá návrhová časť je ovládanie celej sústavy.

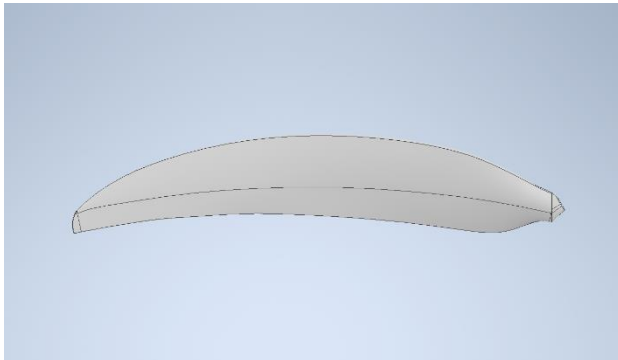
4. Výsledky

Výsledkom práce v tejto štúdií je návrh vrtuľového propulzora pre široké oblasti rýchlosti letu. Hlavná funkcia tohto konceptu bude, že vrtuľové listy budú meniť svoj priemer sklápaním a odklápaním. Koncept nebude dimenzovaný na daný motor, ale bude navrhnutý tak, aby vizualizácia bola inšpiráciou pre ľudí, ktorí by chceli tento koncept skonštruovať. Takisto sa vo výsledkoch zaoberáme funkciou súčiastok, riešeniu konštrukčných otázok a návrhov, ktoré by umožnili funkčnosť konceptu.

4.1. List vrtule

List vrtule je navrhnutý tak, aby pomáhal mechanizmu plniť jeho úlohu, a to znižovať svoj priemer. Tvar listu, kvôli využitiu vrtule pri vysokovýkonných lietadlách bude šablovitý. Okrem menšej úrovne hluku, ktorý list s týmto tvarom dosahuje oproti konvenčnému listu, dokážu sa hroty listu, v jeho maximálnom priemere, udržiavať pri vysokých otáčkach v rýchlostnom rozmedzí pred Machovým kritickým číslom. Skrútenie listu a uhol pri jeho koreni nám zaručuje, že pri otočení sekundárneho ozubeného kolesa listy zmenia svoj priemer. Pokiaľ by bol list kolmý na sekundárne ozubené koleso,

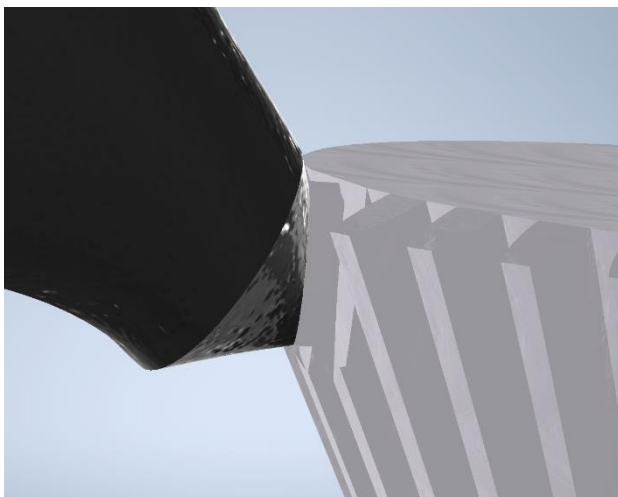
rotačným pohybom ozubeného kolesa by vrtuľa nezmenila priemer.



Obrázok 1. List vrtule

4.2. Koreň listu a spoj s ozubeným kolesom

Spojenie vrtule so sekundárnym kolesom by bolo zváraním, lepením alebo nitovaním. Výber metódy spájania by závisel od toho, aký materiál sa použije na list a ozubené koleso. Spoj je fixný a má odobrané všetky stupne voľnosti. Pozdĺžna os listu vrtule s pozdĺžnou osou ozubeného kolesa zvierajú uhol, ktorý by zabezpečoval zmenu priemeru vrtule pri otočení ozubeného kolesa.



Obrázok 2. Spoj listu s ozubeným kolesom

4.3. Sústava ozubených kolies

Sústava ozubených kolies sa skladá z primárneho ozubeného kolesa a sekundárných ozubených kolies. Počet sekundárných závisí od toho, koľko listov bude mať vrtuľa.

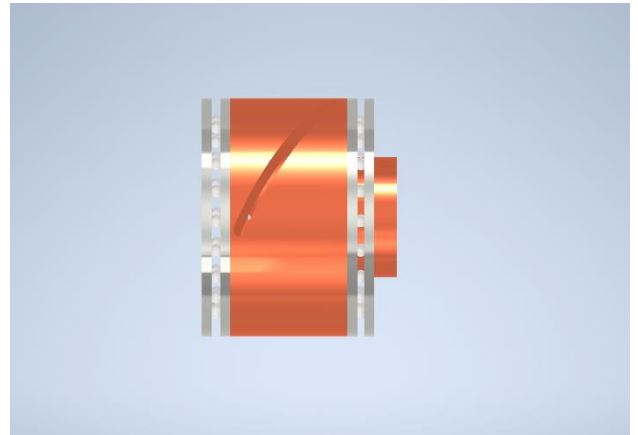
Primárne ozubené koleso prenáša pohyb z otočného mechanizmu tak, aby sa vďaka nemu hýbali sekundárne. Jeho plochou stranou, smerom ku nosu vrtuľového kužeľa, je spojené s otočným mechanizmom a na druhej strane má zúbky. Pomer zúbkov medzi primárnym a sekundárnym ozubeným kolesom je 2:1.

Na sekundárnom ozubenom kolese sa nachádza výrez s elipsoidným tvarom, kde sa spája list vrtule. V jeho útrobach sa nachádza radiálne ložisko, ktoré je vnútornou stranou napojené na tyčinku, ktorá spája sekundárne koleso s vrtuľovým nábojom

tak, aby bola zaistená jeho pozícia a bola umožnená rotácia listov vrtule.

4.4. Otočný mechanizmus

Otočný mechanizmus slúži na premenu posuvného pohybu piestu na rotačný pohyb. Je vložený medzi dve axiálne ložiská tak, aby držal pozíciu a len sa otáčal okolo svojej pozdĺžnej osi. Na jeho obvode sú vytvorené dve dráhy, do ktorých je vložená tyčinka, ktorá je vložená do piestu. Dráhy majú tvar taký, aby pri tlačení tyčinky o ich vnútorné steny, konal mechanizmus rotačný pohyb. Dráha celého posunu piestu musí byť prenesená na rotačný pohyb mechanizmu o 90 stupňov.



Obrázok 3. Uloženie otočného mechanizmu medzi axiálnymi ložiskami

4.5. Tyčinka

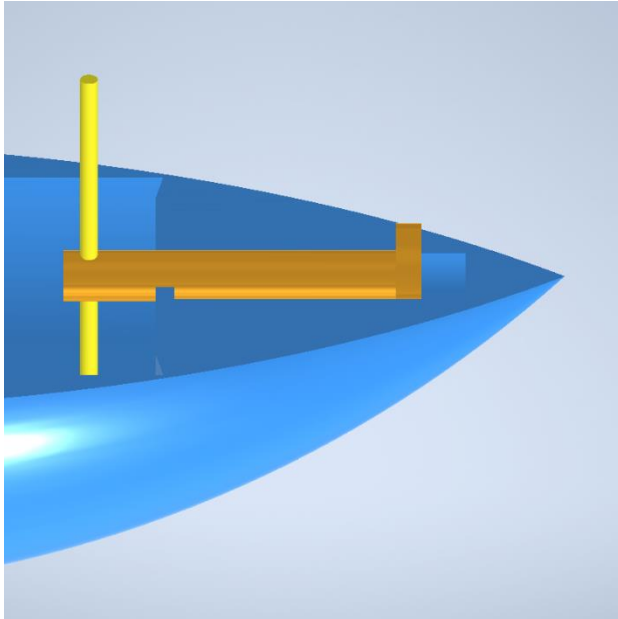
Tyčinka má za úlohu prenášať pohyb z piestu na otočný mechanizmus. V pieste je vložená tak, aby obidve jej časti boli dĺžkovo rovnaké. Konce tyčinky sú vložené do dráhy otočného mechanizmu, na ktorý tlačia. Musí byť vyrobená z pevného materiálu, aby dokázala zniesť všetky zaťaženia a odstredivé sily, ktoré na ňu pôsobia. Môže byť vyrobená napríklad z titánu alebo legovanej ocele.

4.6. Piest, jeho uloženie a pohon

Piest slúži na vykonávanie posuvného pohybu. Skladá sa z hlavičky, na ktoré strany tlačí olej pod takým tlakom, aby posunul piest dopredu alebo dozadu a z tela, na ktorom konci je vložená tyčinka. Je uložený v nose kužeľa.

V nose kužeľa je vytvorené duté valcové uloženie pre piest. Je hermeticky uzavreté, aby z neho nevytekal olej, ktorý sa v ňom nachádza. Olej do uloženia je privedený z motora pomocou tlakových čerpadiel. Jeho vedenie je vedené cez stred mechanizmu tak, aby samotné vedenie nerotovalo. Preto by boli okolo trubice rozmiestnené radiálne ložiská tak, aby sa celá vrtuľa otáčala, okrem stredovej časti.

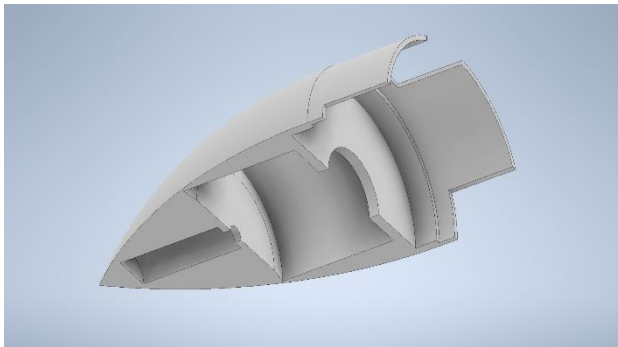
Pohon piestu by bol buď olejový alebo olejovo pružinový. Pri olejovej metóde by sa nachádzal olej na obidvoch stranách uloženia, ktoré rozdeľuje hlavička. Pri pružinovo-olejovej metóde by na jednej strane tlačila pružina na steny piestu, a z druhej strany by sa nachádzal olej.



Obrázok 4. Tyčinka, piest a ich uloženie vo vrtulovom kuželi

4.7. Vrtuľový kužeľ

Úloha vrtuľového kužela je chrániť mechanizmus a umožniť uloženie mechanizmu tak, aby držal svoju polohu a nerozpadol sa. Jeho vnútorná časť sa skladá z uloženia pre piest a steny, ktorá oddeľuje mechanizmus od vrtuľového náboja. Na steny z vnútornej strany sú pripojené axiálne ložiská. V zadnej časti sú výrezy, ktoré slúžia na to, aby listy pri ich pohybe nezasahovali do materiálu kužela. Na zadnej časti je pripojená stena, na ktorej sa nachádza prírubka, ktorá je napojená na planétový prevod z motora, a zároveň tvorí vrtuľový náboj.



Obrázok 5. Vrtuľový kužeľ

4.8. Mazanie vo vrtuli

Pre správne fungovanie mechanizmu musíme zaistiť, aby sa súčiastky netreli o seba. To by spôsobilo rapidné opotrebovanie materiálu, neplynulé pohyby a tým stratu vlastností súčiastok. Preto sa snažíme o hydromechanické trenie medzi súčiastkami. Vrstva filmu by mala byť od 1 až po 5 mikrometrov. Sú tri metódy, ktoré môžeme využiť na mazanie. Olejová, plastická a kombinovaná.

Olejové mazanie by využívalo prefiltrovaný a schladený olej z motora. Olej by sa cez olejové vedenie dostal do vnútra mechanizmu, kde nárazmi o steny a odstredivými silami by sa

dostal medzi súčiastky. Nevýhoda je, že sa olej nemusí dostať medzi všetky súčiastky, alebo nevytvorí dostatočnú vrstvu filmu.

Plastické mazanie by zabezpečovalo vrstvu maziva medzi súčiastkami, ku ktorým sa je ťažko dostať. Máme na výber lítiové a vápnikové mazivo. Plastické mazanie by sa nanieslo manuálne medzi súčiastky. Po určitej dobe by sa súčiastky museli premazať.

Najistejšou metódou je kombinované mazanie. Pri tejto metóde by sme zaistili kontinuálny prísun maziva do mechanizmu. Ak by sa mazivo nedostalo do každej časti, nahradilo by ju už predom aplikované plastické mazivo.

4.9. Ovládanie

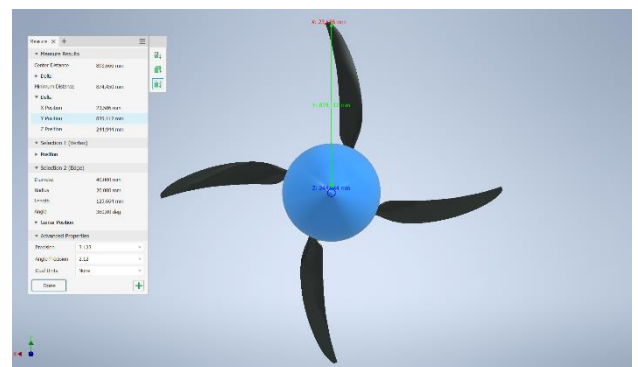
Ovládanie nastavenia priemeru vrtule by bolo automatizované. Využil by sa buď upravený odstredivý regulátor stálych otáčok, alebo systém FADEC. Pri automatizovanom ovládaní je snaha odbremeniť pilota od dodatočných výpočtov synchronizácie otáčok vrtule, s priemerom nastavenia listov.

Odstredivý regulátor stálych otáčok by bol navrhnutý tak, aby korešpondoval s dimenziami listov. Musel by sa nastaviť podľa toho, aký má vrtuľa maximálny priemer. Pri dosiahnutí otáčok, kedy sa hroty listov pohybujú v rozmedziach Machového kritického čísla, by regulátor zareagoval tak, že by sa cez neho dodával olej do čerpadiel, ktoré by ho prepúšťali ku piestu v takom objeme, aby sa zmenil priemer vrtule k daným otáčkam tak, aby korešpondoval s otáčkami vrtule. V podstate by hroty listov nepresiahli kritické Machové číslo.

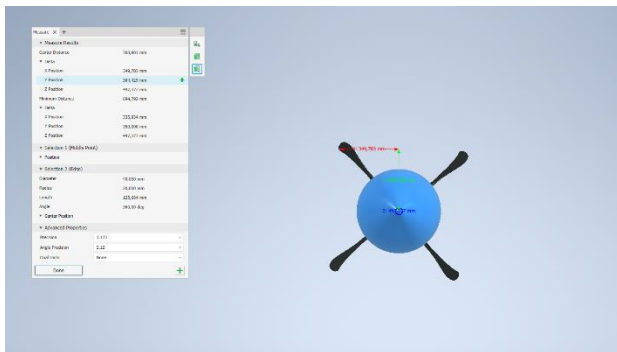
FADEC, teda elektronická riadiaca jednotka motora by prepočítavala dáta, ktoré by boli zbierané z prístrojov. Podľa toho by softvér vypočítal, na aký priemer sa potrebuje vrtuľa zmeniť vzhľadom na počet otáčok za minútu. Softvér by vydal signál už k čerpadlám, ktoré by začali podľa typu signálu prečerpávať olej do, alebo z uloženia piestu.

4.10. Dizajn a funkcia vrtule

Ako bolo v predchádzajúcich kapitolách spomínané, vrtuľa má funkciu meniť svoj priemer. V tejto štúdií bude, pre lepšiu ukážku zmeny, znázornený iba maximálny a minimálny režim. Rozmer, ktorý pri ilustrácii sledujeme, je rozmer osi Y. Os Y udáva hodnotu polomeru od stredu vrtule po hrot listov vrtule. Zmena polomeru je v tomto prípade vyše 400 milimetrov. Takisto je tu vložená ilustrácia uloženia všetkých súčiastok vo vrtulovom kuželi.



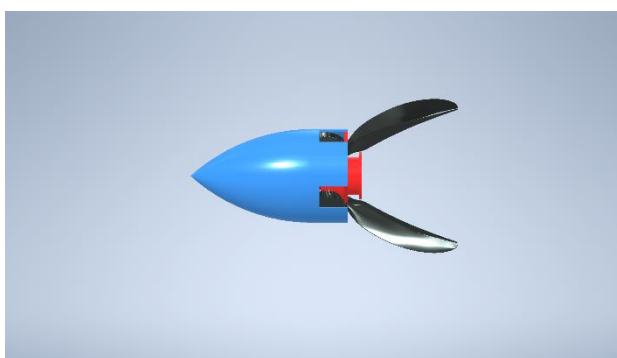
Obrázok 6. Dimenzie vrtule s roziahnutými listami



Obrázok 7. Dimenzie vrtule so stiahnutými listami



Obrázok 8. Náhľad na celkovú sústavu vrtule



Obrázok 9. Bočný pohľad na vrtulu so stiahnutými listami

5. Záver

V dizajnej štúdií sme navrhli koncept, ktorý by mal byť základom a inšpiráciou pre konštruktérov, ktorí sa v budúcnosti budú tejto problematike venovať. Dimenzie tohto konceptu sú všeobecné, lebo sa nerátalo s daným lietadlom pre daný motor. Vizualizácia 3D modelu sa tvorila v Autodesk Inventor, ktorý je zatiaľ postačujúci softvér pre danú štúdiu.

V prevádzke by sa tento koncept mohol uplatniť na väčších civilných turbopropulzorných lietadlách, ako aj na vojenských

lietadlách. Bolo by zaistené plné využitie potenciálu motorov, ako aj skrátenie času letu z jednej destinácie do druhej, kvôli možnosti prepravy väčšími rýchlosťami, ako pri konvenčnej vrtuli. Príklad, na ktorom by sa tento koncept mohol uplatniť je lietadlo Alenia C – 27J Spartan. Tým, že návrh nie je komplikovaný, a tým by nebola ani samotná konštrukcia by sa zabezpečila finančná nenáročnosť na výrobu a údržbu danej vrtule.

Referencie

- [1] IVAN, Jakub. KONCEPT VRTUĽOVÉHO PROPULZORA PRE ŠIROKÝ ROZSAH RÝCHLOSTI LETU. Bakalárska práca, vedúci doc. Ing. Jozef Čerňan PhD. Univerzitné vydavateľstvo Žilinskej univerzity EDIS: Žilinská Univerzita, 2024.
- [2] HITCHENS, Frank E. Propeller Aerodynamics [online]. 1. Andrews UK Limited, 2015 [cit. 2024-04-17]. Dostupné z: https://www.everand.com/read/283098980/Propeller-Aerodynamics-The-History-Aerodynamics-Operation-of-Aircraft-Propellers#__search_menu_903766
- [3] KŘÍŽ, Jozef. Pohonná jednotka. 1. Žilina: EDIS - vydavateľstvo Žilinskej univerzity, 2008. ISBN 978 - 80 - 8070 - 872 - 6.
- [4] HITCHENS, Frank E. The Encyclopedia of Aerodynamics [online]. 1. Andrews UK Limited, 2015 [cit. 2024-04-17]. Dostupné z: <https://www.everand.com/read/352274298/The-Encyclopedia-of-Aerodynamics#>
- [5] RODRIGUEZ, Charles L. Aviation Maintenance Technician Certification Series - Propeller. 1. Tabernash: Aircraft technical book company, 2016. ISBN 978 - 1 - 941144 - 36 - 7.
- [6] BUGAJ, Martin. Aeromechanika 1. 1. Dolis, 2015. ISBN 978 - 80 - 970419 - 3 - 9.