

# NÁVRH A REALIZÁCIA PROTOTYPU VZDUCHOM POHÁŇANEJ VRTULE PRE ŠPECIÁLNE VYUŽITIE

## DESIGN AND IMPLEMENTATION OF PROTOTYPE OF AIR DRIVEN PROPELLER FOR SPECIAL APPLICATIONS

**Petra Frťalová**

Air Transport Department, University of Zilina, Slovakia  
frtalova1@stud.uniza.sk

**Jozef Čerňan**

Air Transport Department, University of Zilina, Slovakia  
jozef.cernan@fpedas.uniza.sk

**Abstract** – Nowadays, there is an increasing emphasis on innovation. Manufacturers are forced to constantly improve their products. Innovations take place also in aviation. Not only manufacturers but also consumers of aviation products and services accentuate the highest possible efficiency of products, both economically and ecologically. This paper provides a theoretical insight into the possible future of aviation by the development of a new type of aircraft propeller. The first part of this paper provides theoretical knowledge of propellers and lift. The second part consist of theoretical design of propeller powered by compressed air from external source. The model of such propeller is created in 3D CAD software. Very last part of this paper is the construction of such model by using a 3D printer to create the components of propeller, joining its parts into one prototype. The last part also contains the results of testing and provides ideas for further improvement.

**Key words** – Propeller, air starter, drive, energy, air, compressor, 3D printing

### I. ÚVOD

Aby sa lietadlo udržalo vo vzduchu a letelo určitým zvoleným smerom, je potrebné vynaložiť istú energiu. Bezmotorové lietadla sa vo vzduchu udržiavajú vďaka stúpavým vzdušným prúdom. Keďže sú prúdy stúpajúceho vzduchu viac menej náhodné, nemožno bezmotorové lietadlo používať ako dopravný prostriedok. Aby od takýchto prúdov nebolo lietadlo závislé, využíva sa energia motora. Aby sa vytvoril vztlak, lietadlo sa musí pohybovať a ku pohybu je nutná hnacia sila. Táto hnacia sila môže byť výsledkom reakcie vzdušného prúdu vyvíjaného vrtuľou alebo reakciou spalín prúdiacich (vytekajúcich) vysokou rýchlosťou z motora.

Vrtule vyvíjaním ťahu menia energiu motora na prácu, ktorú lietadlo vykonáva pri svojom posuvnom pohybe. Využívajú sa najmä v letectve, hlavne v minulosti pred objavením a skonštruovaním prvých prúdových motorov. Dnes je inštalovaná prevažne na ľahkých športových či výcvikových lietadlách

(Cessna, Zlín, a pod.), menších dopravných lietadlách (napr. ATR), vzducholodiach a helikoptéroch, kde je hlavným agregátom vytvárajúcim ťah. Vrtuľa je priamo napojená na motor hriadeľom alebo je poháňaná reduktorom. V oboch prípadoch je ale roztáčaná silou motora.

Cieľom tejto diplomovej práce je navrhnuť taký prototyp vrtule, ktorá nemusí byť napojená na motor aby ju bolo možné roztočiť a splnila tak svoj účel – generovala ťah a takto navrhnutý model aj následne zostrojiť a otestovať jeho funkčnosť. Táto práca ponúka náhľad do možnej budúcnosti určitej oblasti letectva a možnosti využitia vrtule poháňanej prúdom vzduchu v leteckom priemysle.

Vrtuľa je lopatkový stroj premieňajúci mechanickú energiu motora na kinetickú energiu, za účelom vyvinutia sily potrebnej na dopredný pohyb lietadla. Vrtuľa má svoje miesto v letectve od počiatku motorového lietania, až do dnes. V minulosti sa používali pevné dvojlisté drevené vrtule, no postupom času sa začali inštalovať za letu nastaviteľné vrtule, na ktorých je možné zmeniť uhol nastavenia listov pre zvýšenie výkonu. V súčasnosti sa vrtuľa využíva spolu s piestovým motorom najmä na malých lietadlách (športových, cvičných a pod.) a na pohon väčších dopravných lietadiel sa využíva v spojení s turbínovým motorom.

Základnými časťami vrtule sú vlastná vrtuľa, ktorá sa skladá z listov a vrtuľového náboja (aj vrtuľová hlava), v ktorom sú upevnené listy vrtule prenášajúce krútiaci moment z vrtuľového hriadeľa na listy; vrtuľový kryt (kryt náboja, aby nevytváral pri lete veľký odpor) a ostatné príslušenstvo vrtule, ako regulátor otáčok, zariadenie pre nastavovanie uhla listov, či ovládacie a odmrazovacie zariadenie.

Typy vrtúľ môžeme zaradiť do jednotlivých kategórií podľa ich umiestnenia na motore, zmyslu otáčania a možnosti zmeny uhla nastavenia listov.

### PRINCÍP ČINNOSTI

Letecká vrtuľa je aerodynamické zariadenie, ktoré premieňa rotačnú energiu na pohonnú silu a vytvára ťah, ktorý je približne kolmý na rovinu rotácie. Rotačná energia môže byť

produkována motorom s piestovou alebo plynovou turbínou, alebo elektrickým motorom.

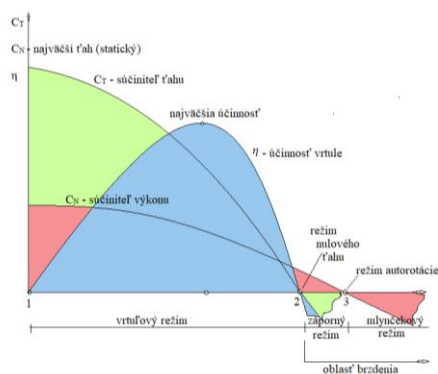
Vrtuľa môže byť pripravená priamo na kľukový hriadeľ piestového motora, ako je to v prípade mnohých ľahkých lietadiel, alebo môže byť poháňaná redukčnou prevodovkou pripojenou na piestový alebo prúdový motor. V tomto prípade redukčná prevodovka slúži na prevod vysokých otáčok motora na rýchlosť vhodnejšiu pre prevádzku vrtule.

Vrtule majú dve alebo viac lopatiek rozmiestnených rovnomerne okolo náboja a sú k dispozícii v konfiguráciách s pevným rozstupom alebo s variabilným rozstupom. Medzi sofistikovanejšie konštrukcie vrtule patria konštrukcie s konštantnou rýchlosťou, koaxiálne – protichodné a protismerné vrtule.

Zatiaľ čo motorom s pomerne malým výkonom stačí, aby mal každý motor iba jednu vrtuľu, ktorá vyhovuje rozmerom lietadla. Pre motory s väčším výkonom je vhodné, s prihliadnutím na rozmery lietadla, inštalovať na každý motor dve vrtule nasadené na dvoch súsoviach protibežných hriadeľoch – protibežné (protichodné) vrtule.

Pre posúdenie vhodnosti vrtule na daný typ lietadla je nutné poznať prevádzkové charakteristiky vrtule. Prevádzkové charakteristiky vrtule sú definované tvarom, rozmermi, dynamickými a kinematickými vlastnosťami vrtule. Základnými typmi charakteristík vrtúľ sú: geometrické, aerodynamické a dynamické charakteristiky.

Geometrické charakteristiky vrtule sú dané tvarom a rozmermi vrtule – priemer, polomer rezu, počet listov, šírka listu, uhol nastavenia profilu listu, hrúbka profilu, geometrické stúpanie listu a pod. Aerodynamické charakteristiky určujú aerodynamické vlastnosti vrtule. Vznik ťahu vrtule môžeme teoreticky vysvetliť ako dôsledok rozdielov tlakov pred a za diskom vrtule, alebo ak uvažujeme vrtuľu ako otáčajúce sa krídlo, potom je ťah daný priemetom výslednej aerodynamickej sily, ktorá pôsobí na listy vrtule, do smeru otáčania. Priemet do roviny otáčania je silou, ktorú je potrebné pri rotácii prekonať krútiacim momentom motora. Základnými aerodynamickými charakteristikami vrtule sú súčiniteľ ťahu a výkonu, rýchlostný súčiniteľ a účinnosť vrtule. Aerodynamické charakteristiky môžeme použiť aj na definovanie pracovných režimov vrtule. Rozlišujeme sedem pracovných režimov vrtule – vrtuľníkový, vrtuľový, režim nulového ťahu, režim brzdenia, režim autorotácie, mlynčekový režim a režim vírového krúžku.



Obrázok 1: Pracovné režimy vrtule [zdroj: autor]

## PRÚDOVÁ VRTUĽA

Špeciálnym druhom leteckej vrtule je prúdová vrtuľa, ktorá nie je poháňaná tradične motorom cez hriadeľ, ale prúdom vzduchu, ktorý vyteká von dýzou, prípadne viacerými dýzami, vo vrtuľovom liste. Takýto prúd vzduchu môže byť generovaný napríklad kompresorom umiestneným v trupe, alebo motormi umiestnenými priamo na špičkách vrtuľových listov.

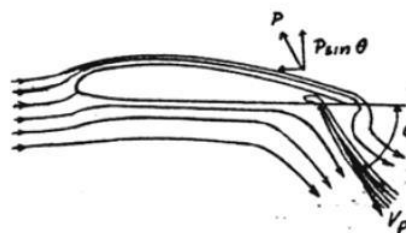
Takáto konštrukcia motorov na špičkách listov je však nevýhodná z hľadiska veľkej hmotnosti a zaťaženia jednotlivých častí odstredivou silou. Okrem toho je problémom aj komplikovaná dodávka paliva a značne je sťažené aj ovládanie a regulácia takýchto motorov. U niektorých typov sa pri takejto konštrukcii prejavila aj výrazne zvýšená miera hlučnosti.

Tento koncept však predstavuje veľkú výhodu najmä u vrtuľníkov, ktoré sú takto poháňané. Vrtuľníky využívajúce pohon prúdovou vrtuľou majú jednoduchšiu konštrukciu, keďže chvostový rotor nie je v tomto prípade potrebný (napr. McDonnell XV-1). Takéto konštrukčné riešenie je spojením pohonu vrtule prúdom stlačeného vzduchu a aktívnych prostriedkov na zvýšenie vztlaku.

## PRÚDOVÁ KLAPKA

Pri navrhovaní prototypu sme využívali aj základné poznatky o aktívnych prostriedkoch vztlakovej mechanizácie pre zvýšenie účinnosti našej vrtule. Využili sme ich najmä pri navrhovaní konštrukcie vrtuľových listov..

Prúdová klapka predstavuje prúd vzduchu, ktorý veľkou rýchlosťou prúdi špeciálne upravenou odtokovou hranou pod určitým uhlom ku spodnej strane povrchu krídla. Princíp funkcie tejto klapky spočíva v zmene obtekania profilu, zväčšovaní zakrivenia profilu a zväčšovaní efektívnej plochy krídla. Vďaka najvyšším prírastkom  $CL_{max}$  je najúčinnnejším zariadením aktívnej vztlakovej mechanizácie, no kvôli svojim nevýhodám, najmä obrovskej energetickej náročnosti, sa v praxi nepoužíva. Taktiež nevýhodou tohto systému je pokles účinnosti v blízkosti zemského povrchu – pri vzlete a pristátí a pri zmenšovaní štíhlosti krídla.



Obrázok 2: Prúdová klapka [8]

## II. METODOLÓGIA PRÁCE

Prvou časťou práce bolo navrhnutie trojrozmerného modelu vrtule. Na návrh 3D modelu vrtule bol použitý software Creo 6.0 od spoločnosti PTC. Ide o popredný 3D CAD software (softvér) slúžiaci na modelovanie jednotlivých častí predmetov ako aj spájanie častí do celkového predmetu. Balík programov dostupný aj v študentskej verzii pozostáva z niekoľkých modulov s rôznymi nástrojmi pre všetky fázy modelovania od

počiatočného návrhu až po možnosť testovania a následnú výrobu predmetu použitím 3D tlačiarň.

Ďalšiu nadväzujúcou časťou práce bolo vytvorenie trojrozmerného modelu takéhoto prototypu vrtule. Na výrobu vrtule bola použitá 3D tlačiareň značky Creality. Takýto spôsob výroby prototypu má mnoho výhod a to najmä pokiaľ ide o zmeny v konštrukcii jednotlivých súčiastok alebo zostáv súčiastok, keďže ich možno prostredníctvom programu jednoducho upraviť či inak modifikovať a opätovne vytlačiť pomerne rýchlo a lacno. Na výrobu takéhoto prototypu je nutné použitie viacerých počítačových programov a softvérov ako napr. softvér na vytváranie modelov CAD, či softvér slúžiaci na ovládanie 3D tlačiarne.

### 3D TLAČ

Aj keď sa môže zdať, že 3D tlač patrí k novým modernej doby, jej história siaha až do 80-tych rokov minulého storočia, no do povedomia sa dostala až vďaka dostupnosti domácich 3D tlačiarň. Prvé pokusy v oblasti 3D tlače sa spájajú s rokom 1980 a objavom techniky tzv. rapid prototyping (rýchlej tvorby prototypov), s ktorou prišiel japonský vedec Dr. Kodama.

Za zakladateľa technológie 3D tlače, označovaného aj „otec 3D tlače“ je považovaný američan Charles W. Hull, ktorý pracoval na vytvorení odolnejších náterov pomocou tekutých materiálov, ktoré po ožiarení UV svetlom zatvrdnú. Vtedy sa zrodila myšlienka vyrobiť prístroj, ktorý by dokázal takýto tekutý materiál vrstviť v niekoľkých vrstvách na seba, zatvrdiť UV svetlom a nanášať ďalšie vrstvy. Pomocou tohto procesu vytvoril prvý 3D model v roku 1983. V roku 1984 obdržal prvý patent za stereolitografický aparát, ktorý používa UV žiarenie na vytvrdnutie prototypu z fotopolymérov.

### III. NÁVRH VRTULE

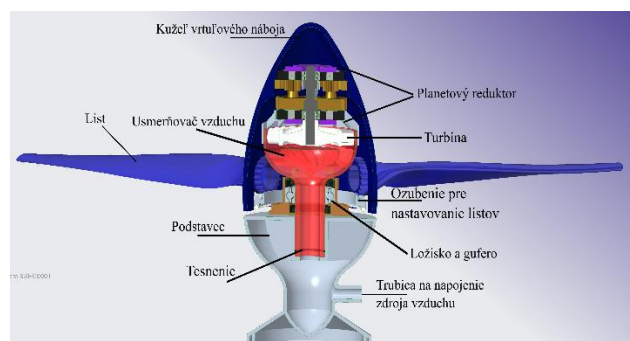
Pri navrhovaní prototypu je nutné brať ohľad na niekoľko podstatných faktorov. Okrem vlastností a charakteristík materiálu použitého na výrobu musíme zohľadniť aj spôsob, ktorým bude vrtuľa zhotovená, teda prispôsobiť návrh tak, aby vyhovoval podmienkam 3D tlače a aby vôbec bolo možné tento návrh zhotoviť. Musíme samozrejme počítať s obmedzenou pracovnou plochou, určitou presnosťou tlače a minimálnou hrúbkou stien jednotlivých vrstiev materiálu. Nami použitá tlačiareň má rozmery pracovnej plochy. Taktiež je nutné návrh prispôsobiť aj rozmerom bežných ložísk. Pri zhotovovaní vrtule chceme použiť bežne dostupné ložiská a hriadeľové tesnenia (guferá), keďže výroba ložísk na mieru je veľmi náročná ako časovo, tak aj finančne.

Nami navrhnutý prototyp vzduchom poháňanej vrtule bol inšpirovaný predchádzajúcim modelom vytvoreným v Košiciach. Oproti pôvodnému modelu však došlo pri navrhovaní našej vrtule ku niekoľkým zásadným zmenám. Všetky inovácie sú podrobnejšie popísané v nasledujúcich podkapitolách.

Takto navrhnutú vrtuľu je možné využívať v horizontálnej aj vertikálnej polohe. Je možné ju využiť napríklad na pohon dronov, ale tiež viacmotorových lietadiel. Využili sme koncepciu šiestich vrtuľových listov, ktoré sú duté a pomerne

úzke aby bola zabezpečená čo najvyššia účinnosť vrtule tak, aby nám tlačiareň umožňovala listy zostrojiť.

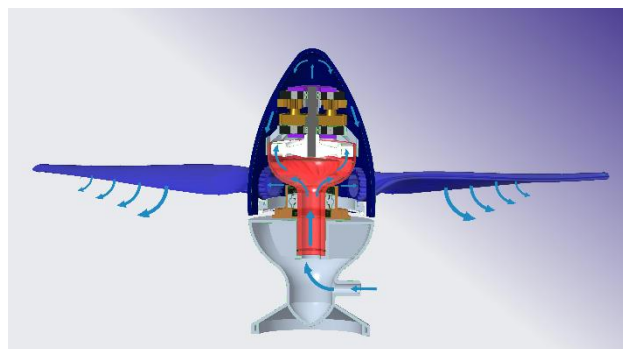
Keďže ide len o ideový návrh, vrtuľa nemá konkrétne parametre. Pri návrhu vrtuľových listov sme vychádzali zo základu bežne používaného profilu NACA 4415, často používaného pre listy vrtuľ.



Obrázok 3: Časti vrtule [zdroj: autor]

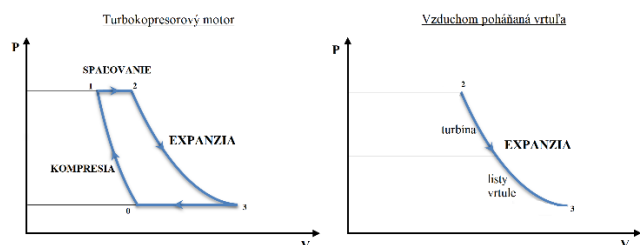
### PRINCÍP ČINNOSTI VRTULE

Princíp činnosti tohto prototypu vrtule spočíva v napojení externého zdroja energie, v našom prípade kompresora, na trubicu, ktorá je súčasťou podstavca vrtule. Vzduch je vháňaný do vnútra podstavca. Odtiaľ prúdi smerom nahor cez trubicu do usmerňovača, ktorý tvoria zaoblené steny a sústava pevných nerotujúcich lopatiek, ktorých úlohou je usmerniť privádzaný prúd vzduchu tak, aby dopadal na lopatky turbíny pod správnym uhlom. Tento prúdiaci vzduch roztáča turbínu, ktorá je hriadeľom napojená na planetovú prevodovku, ktorá je drážkou uchytená na aerodynamický kužeľ – kryt vrtuľového náboja a tým ho roztáča a spolu s ním roztáča aj vrtuľu spolu s listami. Všetok vzduch ktorý prešiel turbínou a roztočil ju sa hromadí vo vnútri kužeľa (konusu) a jediná možná cesta von je vstupovaním do dutých vrtuľových listov, na to prispôbených. Vo vnútri listov sa nachádzajú rozvádzačie rebrá ktoré vedú vzduch listom a na jeho spodnej strane odtokovej hrany vystupujú von úzkymi podlhovastými otvormi. Tento prúd vzduchu smerom von z listov vytvára dodatočnú silu roztáčania vrtuľových listov a zefektívňuje tak rotáciu vrtule. Je samozrejme nutné adekvátne utesnenie všetkých kritických miest, kadiaľ by vzduch mohol unikať, napríklad tesnenie v mieste uloženia vrtuľových listov do aerodynamického kužeľa.



Obrázok 4: Princíp prúdenia vzduchu naprieč vrtuľou [zdroj: autor]

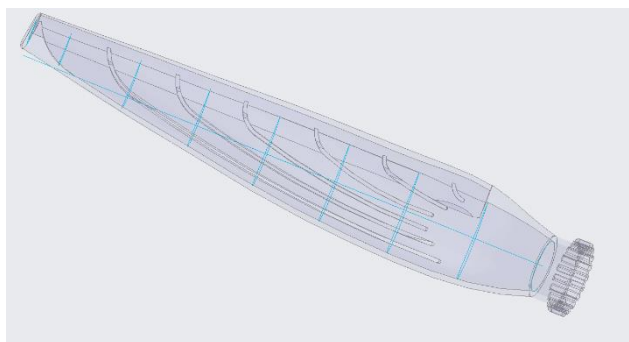
Zdrojom energie na pohon tohto prototypu vrtule je stlačený vzduch. Na vykonanie práce vrtule sa využíva expanzia stlačeného vzduchu podobne ako pri turbokompresorových motoroch. Rozdiel medzi prácou ktorú vykonáva turbokompresorový motor pri generovaní ťahu a prácou ktorú vykonáva vzduchom poháňaná vrtuľa môžeme znázorniť pomocou p-V diagramu. P-V diagram je stavový diagram, v ktorom sa zobrazuje závislosť tlaku plynu na jeho objeme.



### VRTUĽOVÉ LISTY

Základom pre nami navrhnutý vrtuľový list bol štandardný profil NACA 4415. List je dutý aby mal čo najmenšiu hmotnosť a je prispôbený tak aby ním mohol prúdiť vzduch smerom von a tým napomáhať k rotácii vrtuľových listov. Tvarovaný koreň listu s ozubením je špeciálne uložený vo vrtuľovom náboji tak, aby umožňoval natáčanie vrtuľových listov. Táto vrtuľa je vrtuľou s úplným natáčaním listov, teda natáča sa aj v oblasti alfa, ktorá zahŕňa pracovné polohy vrtule vrátane prestavenia do praporovej polohy (listy sú v rovine) aj v oblasti beta, ktorá zahŕňa prestavenie do záporného uhla nábehu (tzv. reverznej polohy), využívanom pri dojazde a brzdení po pristáti.

Charakteristickým znakom pre vrtuľové listy je ich skrútenie, kvôli meniacej sa obvodovej rýchlosti po celej dĺžke listu. Sú taktiež zaoblené dozadu pre zlepšenie aerodynamických vlastností. Našu vrtuľu tvorí celkovo šesť takýchto listov.

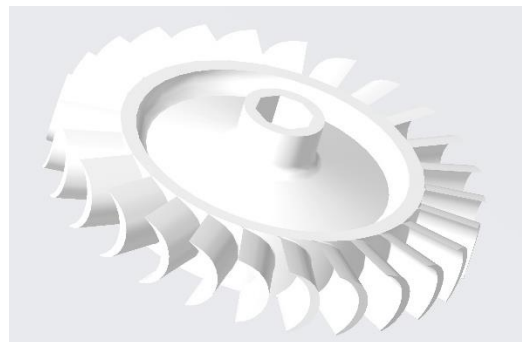


Obrázok 5: Detailný pohľad na vnútornú štruktúru dutého listu vrtule s kanálikmi pre vývod vzduchu [zdroj: autor]

### TURBÍNA

Základom celého tohto projektu bolo upraviť pôvodný koncept vzduchom poháňanej vrtule a pridať do nového návrhu malú turbínu, ktorá bude roztáčaná vzduchom. Taká turbína bude slúžiť na roztáčanie hriadeľa, ktorý bude napojený na planétovú prevodovku a tá bude roztáčať samotný kužeľ (konus), bude teda roztáčať samotnú vrtuľu. Vzduch prúdiaci pomedzi lopatky sa

bude hromadiť v kuželi vrtule a jedinou možnosťou kade bude môcť uniknúť budú vrtuľové listy.



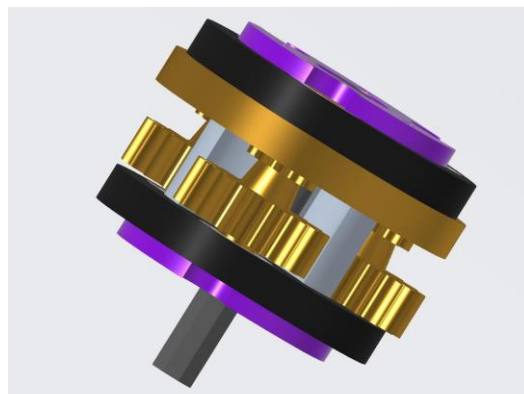
Obrázok 6: Turbína [zdroj: autor]

Tento návrh riešenia vrtule so vzduchom poháňanou turbínou je inšpirovaný vzduchovým spúšťačom využívaným pre štart motorov.

### PLANETOVÝ REDUKTOR

Planétový prevod je špeciálny typ ozubených prevodov a skladá sa z centrálného kolesa, satelitov, unášača a korunového kolesa. Všetky otočné časti sú sústredené okolo hlavnej osi. Satelity sú otočne uložené na čapoch unášača satelitov a sú v zábere s ozubením centrálného kolesa a s vnútorným ozubením korunového kolesa. Výhodami planétovej prevodovky sú menšie rozmer, prenos väčšieho krútiaceho momentu, menšie zaťaženie bokov zubov, radenie prevodových stupňov pod zaťažením a tichší chod.

Planétová prevodovka využitá v modeli vrtule sa skladá z troch ozubených kolies – satelitov, ôsmich malých jednoradových guľkových ložísk, dvoch unášačov zo spodnej a vrchnej strany prevodu, dvoch krytiiek po oboch stranách prevodu, jedného ozubeného kolesa s vnútorným ozubením – korunového kolesa, jedného náhonu – hriadeľa s centrálnym kolesom a poslednou časťou je medzikus, ktorý spája celú prevodovku do jedného celku a uchyťava oba unášače spolu so satelitmi. Táto prevodovka má vo vrtuli veľmi dôležitú úlohu. Slúži na roztáčanie celého konusu (aerodynamického kužela), teda na roztáčanie vrtule.



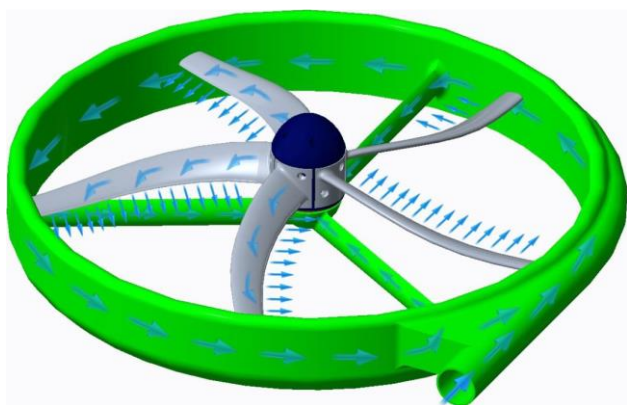
Obrázok 7: Planétový reduktor vrtule [zdroj: autor]

Výpočet prevodového pomeru planétového reduktora navrhnutého prototypu vrtule môžeme vykonať podľa nasledovného vzorca:

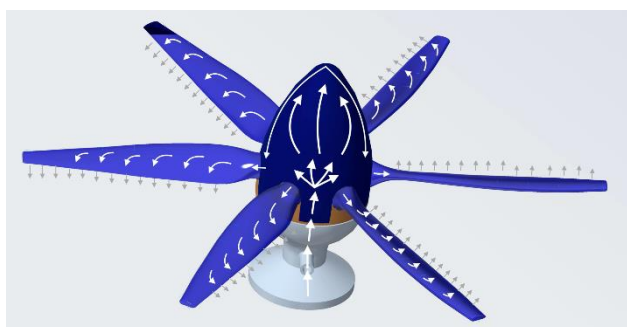
$$i = \frac{z_4 * z_2}{z_3 * z_1}$$

kde  $z$  predstavuje počet zubov jednotlivých ozubených kolies. Po dosadení hodnôt zodpovedajúcich našej prevodovke dostaneme hodnotu prevodového pomeru 9,5625.

#### POROVNANIE PÔVODNÉHO KONCEPTU A NOVÉHO PROTOTYPU VRTULE



Obrázok 8: Pôvodný koncept vzduchom poháňanej vrtule [4]



Obrázok 9: Nový prototyp vzduchom poháňanej vrtule [zdroj: autor]

#### IV. VÝROBA MODELU

Výroba samotného modelu vrtule prebiehala použitím 3D tlačiarne Creality3D CR-10S. Pred začiatkom samotnej tlače je však nutné vykonať niekoľko ďalších úkonov na prípravu modelu, ktorý ideme tlačiť. V programe vytvorený model musí byť uložený v takom formáte, s akým je tlačiareň schopná pracovať. Súčiastky modelované v tomto programe PTC Creo 6.0 sa automaticky ukládajú vo formáte .prt. Keďže tlačiareň nepozná tento formát a nevie s ním pracovať, musí byť preto objekt prekonvertovaný do formátu .stl (stereolitografický formát). Creo 6.0 takúto konverziu umožňuje a tak nebolo na tento úkon potrebné použiť iný špecializovaný program.

Ak už máme takto prekonvertovaný súbor na formát .stl, musíme s pomocou ďalšieho programu vytvoriť z tohto súboru tzv. G-kód. G-kód je súhrn inštrukcií pohybov, ktoré tlačiareň vykonáva pri ukladaní jednotlivých vrstiev materiálu. Služi na vygenerovanie vhodnej trajektórie dýzy tak, aby čo najpresnejšie vytvorila požadovaný objekt. To môžeme dosiahnuť použitím špeciálneho softvéru Ultimaker Cura 4.4.1, ktorý je najpoužívanejším programom na ovládanie 3D tlačiarne. Ponúka rýchle a jednoduché ovládanie 3D tlačiarne, náhľad konečného tlačeneho objektu ešte pred začatím samotnej tlače, ponúka aj informácie o aktuálnom stave tlačiarne či tlačeneho objektu, ale aj funkcie na výpočet materiálu potrebného na tlač ako aj času potrebného na vytlačenie súčiastok.

Na výrobu vrtule sme použili ABS plast. ABS je skratka pre Akrylonitril Butadien Styrén – relatívne nový pevný plastový materiál. Je to amorfný termoplastický polymér vyrobený polymerizáciou styrénu a akrylonitrilu za prítomnosti polybutadiénu (pomer jednotlivých zložiek sa môže líšiť v závislosti od výrobcu). Kopolymér je odolný voči mechanickému poškodeniu, ľahko sa tvaruje a odoláva agresívnym chemickým zlúčeninám.

ABS plast sa vyznačuje mimoriadnou pevnosťou a húževnatosťou. Vykazuje vysokú odolnosť voči nárazom a tlakovým rázom (aj za nízkych teplôt), odolnosť voči šíreniu trhlin a voči oderu. Veľmi dobre odoláva nepriaznivým poveternostným vplyvom a je odolný aj voči UV žiareniu. ABS plast má veľmi nízku tepelnú vodivosť, nie je nutná jeho dodatočná izolácia. Vďaka jeho chemickej odolnosti plastu nevadia soli, no koncentrované kyseliny, silné alkálie, organické rozpúšťadlá či aromatické uhľovodíky mu môžu uškodiť. ABS je nenasiakavý a zdravotne nezávadný. Styren dodáva plastu lesklý a nepriepustný povrch. Polybutadién je kaučukovitá látka a poskytuje ABS pružnosť aj pri nízkych teplotách.

#### MODEL

Model vrtule sa skladá z niekoľkých častí. Všetky sú zobrazené na obrázku nižšie.



Obrázok 10: Časti vrtule [zdroj: autor]

Vrtuľa je tvorená šiestimi dutými vrtuľovými listami, ktoré majú na koreni listu vonkajšie ozubenie a zo spodnej strany malú štrbinu, ktorou uniká vzduch z listov do okolitého prostredia. Toto ozubenie slúži na nastavovanie listov a tým aj zmenu uhla nábehu. Vonkajšiu časť vrtule tvorí aerodynamický kužeľ vrtuľového náboja, ktorý slúži na zefektívnenie aerodynamického obtekania náboja vrtule, znižovanie odporu a má priaznivý vplyv na účinnosť vrtule, spodný kryt vrtuľového náboja, v ktorom je umiestnené 1 jednoradové guľkové ložisko a tesnenie (štandardne dostupné ložisko typu 61802). Tento spodný kryt je k aerodynamickému kužeľu prichytený šiestimi samoreznými skrutkami. Vnútorňa časť náboja je tvorená prstencom s vonkajším ozubením slúžiacim na natáčanie vrtuľových listov, trubicou s hriadeľovými tesneniami (guferami), na zabránenie úniku vzduchu, privádzajúcou vzduch do vnútra vrtuľového náboja, ktorá je napojená na usmerňovací kužeľ. Tento kužeľ obsahuje vo svojej spodnej časti, hneď sa vzduchovou trubicou pevné lopatky, ktoré majú za úlohu usmerniť vzduch tak, aby dopadal na lopatky turbíny pod správnym uhlom. Nad týmito lopatkami sa nachádza spomínaná turbínka, ktorá je vzduchom prúdajúcim zo zdroja roztáčaná a cez hriadeľ s ozubeným kolesom je napojená na planétový reduktor, ktorý sa skladá z troch satelitov, ôsmich ložísk vložených do unášača a korunového kolesa – prstenca s vnútorným ozubením a pripevnené to je celé troma skrutkami. Táto planétová prevodovka má dôležitú úlohu a to roztáčať konus pomocou drážky na jeho vnútornej strane, ktorý je zachytený o vonkajšiu časť krytia prevodovky.

Pre stabilitu vrtule a vytvorenie podmienok pre experiment sme si navrhli a vytlačili podstavec pre vrtuľu, do ktorého je celá vrtuľa vsadená. Na obrázku môžeme vidieť, že podstavec je prispôbosený tak, aby bolo možné naň pripojiť kompresor alebo iný zdroj stlačeného vzduchu.



Obrázok 11: Zhotovená vrtuľa [zdroj: autor]



Obrázok 12: Zhotovená vrtuľa [zdroj: autor]

Tlač a zmontovanie modelu trvali v priemere 2 týždne. Čistý čas tlače bol približne 160 hodín. Väčšinu súčiastok sa nám podarilo vytlačiť na prvýkrát a výsledok vyhovoval montáži, avšak turbínu bolo nutné tlačiť niekoľkokrát. Vyhovujúci bol až štvrtý pokus tlače.

#### EXPERIMENT

Pre vykonanie experimentu bolo nutné k vrtuli navrhnuť v modelovacom programe a vytlačiť na 3D tlačiarňi aj podstavec, ktorý bol špeciálne prispôbosený tak, aby spĺňal požiadavky na stabilitu vrtule a aby bolo možné vykonať experiment. Musel byť vhodne navrhnutý tak, aby bolo možné naň napojiť externý zdroj vzduchu – v našom prípade kompresor a musel byť riadne utesnený tak, aby nedochádzalo ku stratám vzduchu a aby sa do samotného vrtuľového náboja dostalo požadované množstvo vzduchu na pohon vrtule.

Do skúšobného podstavca sme vložili vrtuľu. Keďže sme dopredu nevedeli aký kompresor bude pri vykonaní skúšky a experimentu použitý, bolo pri testovaní nutné na trubicu najskôr napojiť kúsok hadice a až na ňu sa dal napojiť kompresor. Takto zostrojený systém sme položili na váhu a odvážili. Vrtuľa v pokoji spolu s napojenou hadicou vážila 199 gramov (samotná vrtuľa bez hadice má hmotnosť 163 g). Následne sme spustili kompresor a pozorovali, či prúd vzduchu z kompresora roztočí vrtuľu. Výsledok bol pozitívny a vrtuľa sa pod tlakom kompresora o veľkosti 10 barov úspešne roztočila. Prietok vzduchu kompresorom je 412 litrov za minútu.

Na základe meniacej sa hmotnosti na váhe, na ktorú sme umiestnili vrtuľu, môžeme vypočítať, aký ťah v horizontálnom smere nami navrhnutá a zostrojená vrtuľa generuje pri dodaní dostatočného tlaku vzduchu.



Obrázok 13: Experiment pre výpočet ťahu [zdroj: autor]

Testovanie prebehlo pri maximálnom tlaku, ktorý dokáže tento kompresor vyvinúť, teda 10 barov (1MPa). Ťah generovaný vrtuľou sme vypočítali na základe hmotnosti vrtule. Vrtuľa má spolu s testovacím podstavcom 199 g. Pri dodaní tlaku približne 10 barov (niektoré časti neboli dokonale utesnené a vzduch z malej časti unikal) vrtuľa odľahčila váhu v priemere o

50g. Kvôli neúplnej presnosti 3D tlače, mali niektoré plochy vrtule nedokonalu hladké povrchy a v určitých bodoch sa rotácia vrtule mierne spomaľovala, čo malo za následok kolísanie údaju na váhe. Najnižšia dosiahnutá hmotnosť zobrazená na váhe bola však 141 g a teda vrtuľa bola odľahčená až o 58 g. Pri výpočte sme pracovali z najvyššou dosiahnutou hodnotou odľahčenia, teda 58 g (0,058 kg). Ťah vrtule P stanovíme pomocou jednoduchého výpočtu podľa vzťahu:

$$P = m * g,$$

kde  $m$  je hmotnosť o ktorú vrtuľa počas testu odľahčila váhu a  $g$  je gravitačné (tiažové) zrýchlenie, ktoré vrtuľa svojim pôsobením vykonáva. Hodnota gravitačného zrýchlenia je 9,81 m/s<sup>2</sup>. Po dosadení oboch hodnôt do vzťahu dostaneme výsledný ťah o veľkosti 0.57 N.

Výsledný maximálny dosiahnutý ťah vrtule je teda 0,57 N. Tento výsledok nie je uspokojivý, ale je možné vrtuľu upraviť, napríklad zabrániť stratám vzduchu v rôznych častiach vrtule dostatočným utesnením. Vyhladením vnútorných povrchov vrtule, najmä v oblastiach kde dochádza k treniu jednotlivých častí je tiež možné dosiahnuť vyššiu rýchlosť rotácie a tým väčšiu efektívnosť vrtule.

#### VZUŽITIE

Nami navrhnutý prototyp vrtule je možné využívať v horizontálnej aj vertikálnej polohe. Jednou z možností horizontálneho využitia je inštalácia takejto vrtule na dron. Veľkou výhodou v tomto prípade je nízka hmotnosť vrtule, čo by nemalo negatívne ovplyvniť hmotnosť drona. Ako pohon vrtúľ by mohol slúžiť malý kompresor umiestnený vo vnútri kostry drona a vzduch z neho by bol rozvádzaný cez ramená až do vnútra vrtule.

Ďalšia možnosťou využitia takejto vzduchom poháňanej vrtule, no inštalovanej vo vertikálnej polohe, môže byť výhodným riešením aj pre viacmotorové lietadlá. Miesto veľkých motorov generujúcich nadbytočný čelný odpor počas letu, by sa dala využiť na pohon takto konštruovaná vrtuľa. Vrtuľa, alebo viac vrtúľ, by mohla/i byť zavesená/é priamo na krídlach a kompresor ktorý by vŕhal do nich vzduch môže byť umiestnený v trupe lietadla. Pre väčšiu účinnosť môžeme uvážiť aj niekoľko kompresorov – každá vrtuľa môže mať svoj vlastný zdroj. Znížil by sa tak výrazne odpor ktorý lietadlo generuje pri lete (odstránil by sa odpor generovaný motormi), znížila by sa hmotnosť lietadla, čo by pozitívne prispelo aj ku zlepšeniu spotreby, nehovoriac o výraznom zlepšení, čo sa týka hlučnosti lietadiel, keďže vieme že hluk ktorý lietadlo pri lete produkuje je hluk draku (hluk, ktorý vzniká obtekaním vzduchu okolo letiaceho lietadla) a hluk motorov.

#### V. ZÁVER

Cieľom tejto práce bolo v počítačovom programe na modelovanie navrhnuť prototyp vzduchom poháňanej vrtule, model prispôbiť podmienkam 3D tlače a následne tento model vytlačiť na tlačiarňu dostupnej na pôde univerzity. Model bolo nutné následne z jednotlivých tlačných častí poskladať a zistiť jeho funkčnosť testovaním.

Zhotovený model bol napojený na kompresor a preukázal svoju funkčnosť avšak pri testovaní a výpočtoch ťahu, ktorý by takto zostrojená vrtuľa bola schopný vygenerovať sme dospeli k výsledkom, ktoré nás veľmi nepotešili. Samozrejme výpočty neboli úplne dokonalé, ale na základe nich sme zistili, že ťah generovaný vrtuľou bol iba 0,57 N. Príčinou bolo pravdepodobne nedokonalé utesnenie vrtule vo viacerých miestach, keďže sa jedná o 3D model vytlačený domácou tlačiarňou predpokladali sme nepresnosti tlače a počítali sme s podobným výsledkom. Druhým činiteľom, ktorý sa vo veľkej miere podieľal na neuspokojivom výsledku testovania, bol samotný kompresor, ktorý vrtuľi dodával príliš nízky tlak a v spojení s nedostatočným tesnením sa to výrazne odzrkadilo na výsledkoch testu.

Riešením by mohlo byť bezchybné utesnenie všetkých priestorov, ktorými by vzduch mohol neželane z vrtule uniknúť, napríklad v miestach uloženia listov, a samozrejme výkonnejší zdroj, ktorý by vrtuľi dodával o mnoho viac energie potrebnej na vykonávanie práce.

Samozrejme ide iba o prototyp a táto vrtuľa má celkom iste veľký potenciál aj pre letecký priemysel. Takáto vrtuľa, no profesionálne zostrojená, by mohla byť prínosom pre budúcnosť letectva. Možno ju inštalovať horizontálne orientovanú napríklad na drony, no svoje využitie by našla aj inštalovaná vo vertikálnej polohe napríklad na viacmotorových lietadlách. Vrtuľa by mohla byť zavesená priamo na krídle a ako zdroj vzduchu by jej mohol slúžiť kompresor umiestnený v trupe lietadla. Pre fungovanie vrtule a vznik ťahu by tak už nebolo potrebné jej napojenie na motor, čím by sa výrazne zefektívnila letecká doprava ako po ekonomickej, tak i po ekologickej stránke. Eliminovať by sa tak hluk spôsobený motormi, či škodlivé emisie, ktoré produkuje spaľované letecké palivo.

#### POĎAKOVANIE

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu **KEGA 048ŽU-4/2020** s názvom "Zvyšovanie kľúčových kompetencií v oblasti technológie údržby lietadiel prostredníctvom transferu progresívnych metód do vzdelávacieho procesu".

#### REFERENCIE

- [1] KRÍŽ J. 2008. Pohonná jednotka: JAA ATPL výcvik. Žilina: EDIS, 2008. 285 s. ISBN 978-80-8070-872-6
- [2] GAŠPAROVIČ P. – MAŤAŠ M. Stand for electric measurement of small propeller power unit performance in wind tunnel
- [3] ALEXANDROV, V.L. Letecké vrtule. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, n.p., 1954. 464 s.
- [4] KUBASKÝ, D. Návrh a realizácia konštrukcie prúdovej vrtule s využitím 3D tlače: diplomová práca. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta, 2017. 61 s. [cit. 2020-02-11]
- [5] GAŠPAROVIČ, P. – JUDIČÁK, J. 2015. Modul 17 – Vrtule: Učebný text pre technikov údržby lietadiel podľa predpisu Part 66. Technická univerzita v Košiciach, Košice 2015. ISBN 978-80-553-2034-2

[6]

- [7] RAKOVSKÝ, K. Vztlaková mechanizace křídla: bakalárska práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav, 2013. 54 s. [cit. 2020-02-05]
- [8] AeroEngineering 315, Lesson 17 – High Lift Devices [online]. [cit. 2020-01-15] Dostupné na internete:
- [9] <https://slideplayer.com/slide/3853351/>
- [10] PÁVEK, J. – KOPŘIVA, Z. 1982. Konstrukce a projektování letadel I. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1982. 203 s.
- [11] DANĚK, V. 2003. Modul 8 – Základy aerodynamiky: Učební texty dle předpisu JAR-66. České vysoké učení technické v Praze: Fakulta dopravní. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno 2003. 164 s. ISBN 978-80-7204-316-3
- [12] PAVLINSKÝ, J. Aerodynamické meranie modifikovaného krídelkového úseku krídla vetroňa VSO-10: bakalárska práca. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta, 2015. 61s. [cit. 2020-02-21]
- [13] Aerodynamics: The Four Forces Part 2 [online]. [cit. 2020-03-01] Dostupné na internete: <http://learntoflyblog.com/2014/09/18/learn-to-fly-6-the-four-forces-part-2/>
- [14] The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today [online]. [cit. 2020-03-20] Dostupné na internete: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/>
- [15] GREGURIĆ, L. 2018. History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented? [online]. [cit. 2020-03-20] Dostupné na internete: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [16] ČERŇAN, J., HOCKO, M., CÚTTOVÁ, M. & SEMRÁD, K. 2016. Analysis of damaged turbine blades of the engine MPM 20. Acta Metallurgica Slovaca 22(2), pages 120-127.
- [17] ČERŇAN, J., RODZIŇÁK, D., SEMRÁD, K. & CÚTTOVÁ, M. 2016. Material analysis of selected parts of the MPM-20 jet engine. Advances in Military Technology 11(1), pages 89-100
- [18] ČERŇAN, J. & HOCKO, M. 2019. The investigation of turbine blades damage in small jet engine. Transport Means - Proceedings of the International Conference 2019-October, pp. 1285-1290."
- [19] BUGAJ, M. 2015. Aeromechanika 1: základy aerodynamiky. Bratislava : DOLIS, 2015. - 208 s., ilustr. - ISBN 978-80-970419-3-9.
- [20] BUGAJ, M., NOVÁK, A. 2010. Všeobecné znalosti o lietadle : drak a systémy, elektrický systém. - 1. vyd. - Žilina : Žilinská univerzita, 2004. - 247 s. - ISBN 80-8070-210-1.

Bc. Petra Frťalová – narodená dňa 09.04.1997 v Bratislave absolvovala v roku 2015 osemročné gymnázium zamerané na výučbu ekológie a cudzích jazykov v Bratislave, následne od roku 2015 študovala na Žilinskej univerzite v Žiline v odbore letecká doprava .