

DESIGN OF LUBRICATION SYSTEM, DESIGN OF MOTOR BED, SELECTING OF PROPELLER FOR AIRCRAFT PISTON ENGINE

NÁVRH MAZACEJ SÚSTAVY, NÁVRH MOTOROVÉHO LÔŽKA, VÝBER VRTULE PRE LIETADLOVÝ PĽESTOVÝ MOTOR

Michal Suk

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
email@email.com

Jozef Čerňan

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
email@email.com

Abstract

I will briefly address the three orientations of my paper in this scientific article. I will not go into details in the article. In the first part I will briefly describe the design procedure of a piston engine lubrication system, the requirements that a lubrication system should meet with respect to different types of piston engines and their focus, elements of the lubrication system and the properties of oils as lubricating fluids. In the next part I will describe the types and constructions of aircraft engine beds, technical requirements for aircraft engine beds and individual loads that the aircraft engine bed must withstand. In the last part I will focus on aircraft propellers. I will explain the basic principle of the propeller, the individual rules for selecting a propeller for a piston engine, safety requirements for an aircraft propeller and the dividing of basic types of aircraft propellers for aircraft piston engines.

Keywords

Lubrication system, wet sump, dry sump, lubrication fluids, engine bed, aircraft envelope, propeller, blade air foil

1. Návrh mazacej sústavy

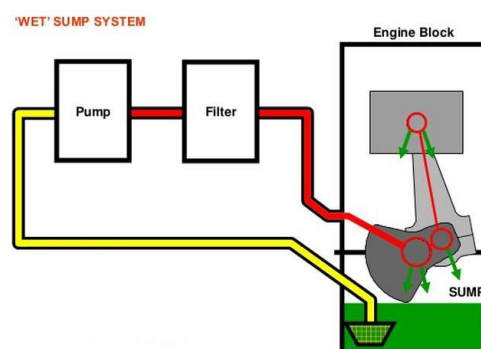
Pri návrhu mazacej sústavy je potrebné brať na zreteľ mnoho faktorov ako veľkosť motora (počet valcov, objem a pod.) a druh motora. Naftové motory majú celkovo nižšie pracovné teploty spaľovania ako benzínové motory. Je všeobecne známe, že prevádzková teplota väčšiny spaľovacích motorov, či už benzínových alebo naftových, je 90°C. Od teploty závisí zmena vlastností resp. viskozity mazacej látky a to nepriamoúmerne.

Potrebná viskozita mazacej látky závisí aj od iných faktorov ako sú najmä drsnosť povrchov mazaných pohyblivých častí. Ďalším faktorom sú pracovné otáčky, čím sú vyššie pracovné otáčky daného motora, tým by mali byť prietoky jednotlivých potrubí a systémov kanálikov väčšie, tak aby bolo vytvorené hydrodynamické trenie medzi pohyblivými časťami motora. K tomu by malo byť nadimenzované aj olejové čerpadlo tak aby bola zabezpečená stála cirkulácia a tlak vzhľadom na pracovný režim motora. Z hľadiska pracovného tlaku a teplôt by mali byť vhodne navrhnuté aj olejové tesnenia. Z pohľadu letectva je dôležitý aj diferenčný tlak (rozdiel atmosférického tlaku a tlaku v mazacej sústave).

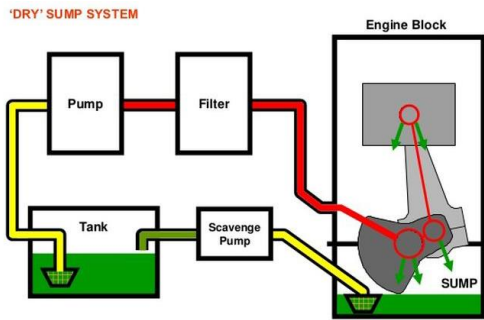
Následne je si potrebné uvedomiť, či bude mať daný motor preplňovanie, nakoľko pri väčšine piestových motorov býva preplňovací agregát mazaný motorovým olejom.

Možno spomenúť, že celková konštrukcia mazacej sústavy piestového motora je tiež závislá od zmýšľaného spôsobu prevádzky. V letectve totiž rozlišujeme dopravné vrtuľové lietadlá vrátane ultraľahkých lietadiel STOL určených na bežné lietanie a lietadlá športové, určené napríklad na predvádzacie manévry. V športových lietadlách môžeme nájsť motory so

systémom suchej vane schopné pracovať pri akomkoľvek náklone, zatiaľ čo v bežných lietadlách sa nachádzajú motory s mokrou olejovou vaňou, ktoré by sa pri dlhodobom väčšom náklone nemazali a ich životnosť by sa prudko znižovala až by hrozilo poškodenie (pridretie alebo úplné zadrenie mechaniky).



Obrázok 1: Olejový systém s mokrou vaňou. Zdroj [1].



Obrázok 2: Olejový systém so suchou vaňou. Zdroj: [1].

1.1. Požiadavky na mazacu sústavu piestového motora

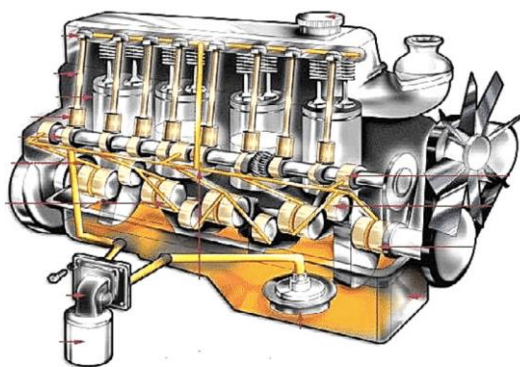
Mazacia sústava piestového motora musí zabezpečiť dostatočné a spoľahlivé mazanie pohyblivých častí piestového motora pri počiatočných teplotách aj pri pracovných teplotách. Zároveň by nemala zbytočne zvyšovať hmotnosť motora a spôsobovať vyššie mechanické straty v dôsledku vysokého hydrodynamického odporu (kinematická viskozita) a tým vyššiu spotrebu paliva.

Sekundárna úloha mazacej sústavy je čiastočné chladenie mechaniky motora nakoľko majú motorové oleje istý odvod tepla, ktoré je odovzdávané následne olejovému chladiču.

1.2. Prvky mazacej sústavy

Prvky mazacej sústavy rozlišujeme vnútorné a vonkajšie. Vnútornými prvkami môžu byť okrem systému kanálov vyfrézovaných v bloku motora aj:

- skupina regulačných a poistných ventilov kvôli regulácii prietoku a teploty oleja
- triskové prívody k pohyblivým častiam mechaniky motora ako sú napríklad ložiská (konštrukcia trysiek / prívodov závisí najmä od typu ložísk resp. či ide o guľôčkové, tyčové alebo kĺzne ložiská)

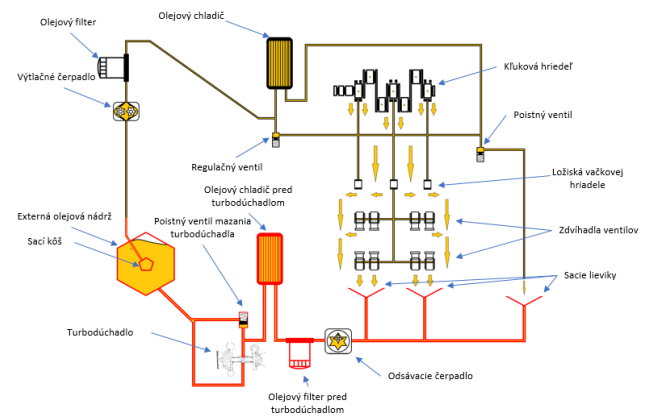


Obrázok 3: Vnútorný a vonkajší mazací systém piestového motora. Zdroj: [2].

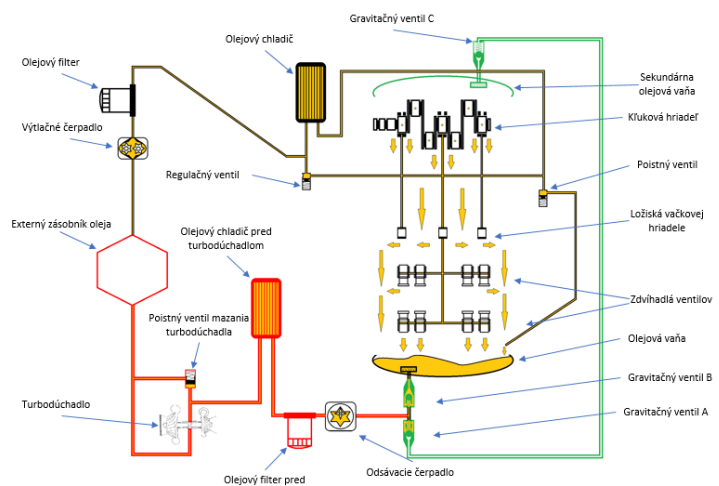
Vonkajšími prvkami sú okrem systému olejových potrubí najmä:

- olejové čerpadlo, ktoré môže byť odsávacie a výtlačné, zubové alebo G-rotor (v závislosti od systému olejovej vane)

- olejový filter pre odstraňovanie nečistôt z oleja (zväčša kovové piliny pri zábehu motora)
- akumulátory oleja pre plynulý prietok oleja a tlmenie hydraulických rázov, môžu slúžiť aj ako externé zásobníky oleja ako súčasť systému suchej olejovej vane (obvykle len pri leteckých akrobatických motoroch)
- odlučovač plynov, ktorý slúži na odlúčenie peny z oleja (preplňované motory s citlivými vysokootáčkovými ložiskami turbodúchadla)
- gravitačné ventily na spoľahlivý prechod režimu mazania motora pri veľkých náklonoch počas chodu (letecké motory so suchou vaňou alebo s dvojitou vaňou...)
- vonkajšie poistné a regulačné ventily (regulácia prietoku oleja cez turbodúchadlo a pod.)



Obrázok 4: Upravený mazací systém preplňovaného motora so suchou vaňou. Zdroj: Autori.



Obrázok 5: Upravený mazací systém s dvojitou vaňou. Zdroj: Autori.

1.3. Materiál a drsnosť povrchov mechaniky

Od materiálu a drsnosti povrchov závisí najmä predpísaný olej. V jednoduchosti platí, že staršie motory, ktorých súčiastky majú drsný povrch (napr. $\mu = 0,0009$ a viac), používajú pre mazanie hustejšie oleje, kvôli čo najhrubšej hydrodynamickému vrstve, ktorá zabezpečí, že vrcholky členitého povrchu súčiastok sa nebudú dotýkať a spôsobovať medzné trenie. Súčasná technológia výroby a obrábania (brúsenia) umožňuje vyrobiť

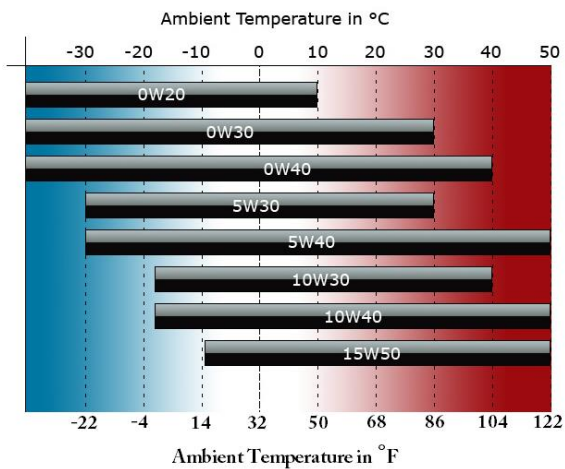
súčiastky s ultrahladkým povrchom (napr. molibdenové povrchy), vďaka čomu je možné používať redšie oleje v moderných motoroch. Tým je znížený hydrodynamický odpor vďaka čomu je dosiahnutý väčší výkon a menšia spotreba paliva piestového motora.



Obrázok 6: Medzné trenie povrchov (vľavo) a hydrodynamické trenie (vpravo). Zdroj: [3].

1.4. Použitý olej

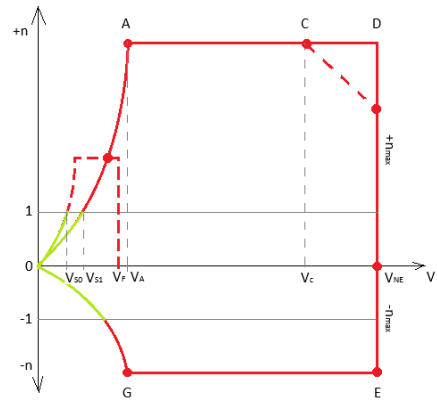
Použitý olej je závislý od povrchov súčiastok a najmä od prostredia v ktorom bude daný olej pracovať. Vlastnosti oleja ako je hlavne jeho viskozita pri počiatkovej prevádzke (štart) závisia na atmosférickej teplote okolia. V súčasnosti rozlišujeme viacstupňové oleje, ktoré dokážu meniť svoju viskozitu medzi počiatkovou a pracovnou teplotou. Napríklad Olej 5W30 má kinematickú viskozitu pri -20°C okolo 3500 a pri 90°C okolo 3,8. Napriek zdanlivo veľkému rozdielu viskozít je vhodný najmä pre motory pracujúce v miernom podnebí ako je napríklad oblasť Európy. Hustejšie oleje 10W30 až 15W30 sú vhodnejšie do horúceho prostredia, pretože ich viskozita sa neznižuje na toľko aby nemal olej mazacie vlastnosti. Naopak riedke oleje ako napr. 0W40 až 0W15 sú vhodnejšie do studených (napr. sibírskych) oblastí.



Obrázok 7: vplyv teplôt na viskozitu olejov. Zdroj: [4].

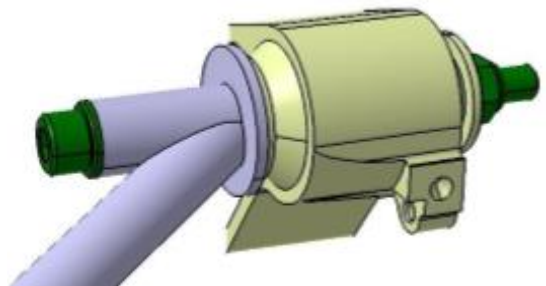
2. Návrh motorového lôžka pre lietadlový piestový motor

Návrh motorového lôžka zahŕňa výber typu konštrukcie a niekoľko pevnostných výpočtov a výpočtov prierezov. Vstupnými parametrami sú váha, poloha ťažiska a letová obálka preťaženia lietadla popr. obálka poryvov preťaženia lietadla. Nakoľko lietadlo pri prudkých manévroch býva od preťaženia najviac namáhané, namáhania pri poryvoch nie sú uprednostňované vo výpočtoch.



Obrázok 8: Letová obálka preťaženia lietadla. Zdroj: Autori.

Uchytenia lôžka k motoru a k lietadlu by malo byť realizované skrutkovým spojom kvôli požiadavke jednoduchej montáže a demontáže. Ak je lôžko realizované ako prútová konštrukcia, jednotlivé pruhy sa zvyknú spájať zvarovými spojmi.



Obrázok 9: Uchytenia motorového lôžka. Zdroj: [5].

2.1. Požiadavky na motorové lôžko

Motorové lôžko by malo podľa predpisov odolávať najväčšej sile spôsobenej nielen tiažou motora ale aj jeho násobkom v dôsledku preťaženia n , z každej strany lôžka vrátane uchytení. Ďalšími požiadavkami sú hmotnosť a jednoduchosť. Hmotnosť súvisí najmä s použitým materiálom, v letectve sa používajú ľahké zliatiny na báze hliníka ako napríklad dural. Jednoduchosť súvisí s konštrukciou, v letectve sa obvykle používa pre motorové lôžka piestových leteckých motorov, prútová konštrukcia.

Ďalšou požiadavkou je robustnosť. Motorové lôžko by malo umožňovať jednoduchú a rýchlu výmenu motora. A tiež by mal byť medzi lôžkom a motorom priestor pre pomocné agregáty ako je napríklad štartér, alebo riadiaca jednotka a ďalšie elektrické príslušenstvo.

2.2. Typy konštrukcii motorových lôžok

Vo všeobecnosti rozlišujeme konštrukcie prútové, plno stenné alebo kombinované.

Název schéma	Radové motory		Hvězdicové motory	
	Lože s příčným vyztužením. Motory s rozpinnou síťňň	Lože bez příčného vyztužen. Motory s masnou síťňň	Jednoduchá příhradovina	Stoňňňá příhradovina
Přihradové	Schema 1	Schema 2	Schema 3	Schema 4
Plošňňňá		Schema 5		
Plošňňňá-přihradové	Schema 6	Schema 7		Schema 8

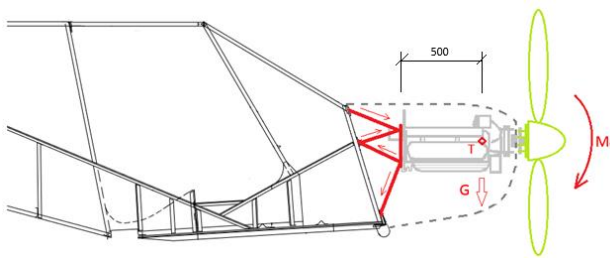
Obrázok 10: Typy motorových ložok. Zdroj: [5].

Prúťové konštrukcie sú najčastejšie používané vďaka svojej robustnosti. Používajú sa najmä pre piestové motory a dokážu sa prispôbiť pre uchytanie motora z akejkoľvek strany resp. v zadnej časti, v spodnej časti aj v hornej časti (neobvyklé).

Plno stenné konštrukcie sú v podstate nosníky, ktoré dokážu motor uchytávať len zo spodnej časti. Typické sú najmä pre automobilový priemysel, v letectve nie sú často využívané. Profily nosníkov bývajú štvorcové, v tvare „I“ alebo v tvare „U“. Ich výhodou je jednoduchosť. Kombinované motorové ložka alebo tzv. plno steno-priehradové ložka sú typické pre uchytávanie motora na krídle viacmotorového lietadla. Sú konštrukčne zložité a používajú sa spolu s pylónmi na uchytanie turbínových motorov dopravných lietadiel.

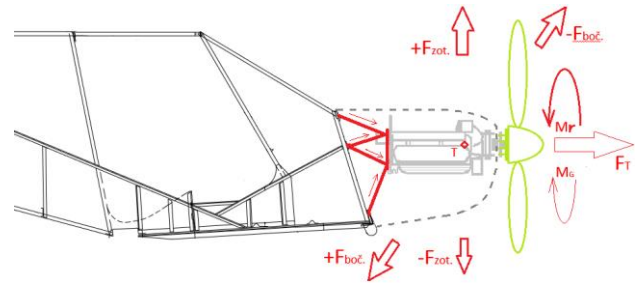
2.3. Sily pôsobiace na motorové ložko

Sily pôsobiace na motorové ložko lietadla sú v skutku rozmanité. Môžeme ich rozdeliť na sily pôsobiace na ložko pri stacionárnej polohe a sily pôsobiace na ložko za letu.



Obrázok 11: Sily pôsobiace na motorové ložko pri stacionárnej polohe. Zdroj: Autori.

Sily pôsobiace na ložko za letu sú násobkom síl pri stacionárnej polohe a nazývajú sa tiež zotrvačné sily. Násobok síl súvisí s letovou obálkou daného lietadla a nazýva sa aj preťaženie „n“. Okrem zotrvačných síl pôsobí na motorové ložko piestového motora lietadla ťahová sila a momenty od vrtule. Momenty od vrtule rozlišujeme gyroskopický moment a reakčný moment. Gyroskopický moment sa zvykne pri výpočtoch motorového ložka zanedbať.



Obrázok 12: Sily pôsobiace na motorové ložko za letu. Zdroj: Autori.

Zotrvačné sily sa počítajú pri konštruovaní ako:

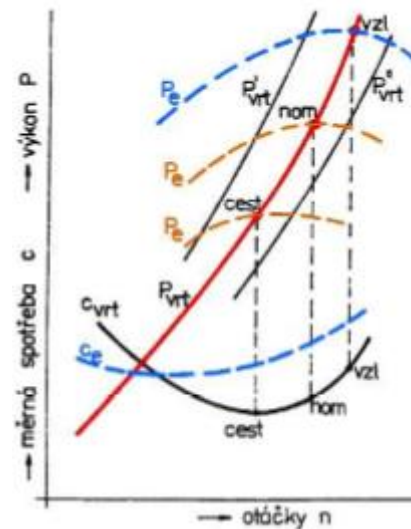
A) návrhové zaťaženia: súčin tiaže motora, násobku preťaženia v bode A (najvyššie preťaženie pri prudkom stúpaní) a gravitačného zrýchlenia.

B) bočné zaťaženia: súčin tiaže motora, troch štvrtín preťaženia „n“ a gravitačného zrýchlenia. Jednotlivé sily sa zvyknú násobiť podľa väčšiny svetových konštruktérskych predpisov bezpečnostným násobkom „k“, jeho hodnota závisí od uplatneného predpisu. Napríklad podľa predpisu L8 leteckého úradu SR je $k = 1,5$.

Ďalšie konštruktérské výpočty bývajú v súčasnosti počítané v CAD softvéroch (pevnostné kontroly prúťov, skrutiek a uchytení, zvarných spojov, mechanické napätia a pod.)

3. Výber vrtule pre lietadlový piestový motor

Výber vrtule pre lietadlo s piestovým motorom sa odvíja od výkonu a krútiaceho momentu daného motora. Dôležité je poznať charakteristiku týchto parametrov v závislosti od otáčok.



Obrázok 13: Ptáčkové charakteristiky vrtule a motora. Zdroj: [6].

Pretože väčšina bežne dostupných leteckých vrtúľ dokáže efektívne vyvíjať maximálny ťah v rozmedzí 2000 až 3000 ot./min. Ak je výkon motora pri týchto otáčkach nedostatočný, predradí sa medzi výstupom motora a vrtuľou reduktor PSRU. Reduktor PSRU je jednostupňová prevodovka resp. súkolesie s priamym spojením ozubených kolies, s remeňovým spojením alebo s reťazovým spojením. Prevodový pomer závisí od pracovnej otáčkovej charakteristiky motora a charakteristiky

vrtnule. Napríklad ak dosahuje daný motor maximálny výkon pri 6000 ot./min a vybraná vrtnuľa má najvyšší ťah pri 2400 ot./min, prevodový pomer bude 2,5 : 1.

Od veľkosti výkonu motora závisí typ vrtnule. Čím väčší výkon ma motor, tým môže mať vybraná vrtnuľa väčší priemer, viac listov (než dva), väčší uhol nastavenia, hrubší profil a väčšiu tetivu v 75% dĺžky listu.

V súčasnosti sú bežne dostupné dvoj listé a troj listé vrtnule, s pevným uhlom nastavenia (pevné vrtnule) alebo s nastaviteľným uhlom nastavenia (na zemi nastaviteľné vrtnule alebo vrtnule stálych otáčok), drevené alebo kompozitné od rôznych výrobcov. Na Slovensku a v Českej republike je známy výrobca Woodcomp.

Najefektívnejšia spolupráca motora a vrtnule sa dosiahne použitím vrtnule stálych otáčok, kedy sa dokáže uhol nastavenia prispôbiť rýchlosti letu pri stálych otáčkach motora.



Obrázok 14: Dvojlistá vrtnuľa Woodcomp SR 3000N. Zdroj: [7].

3.1. Požiadavky na leteckú vrtnuľu

Letecká vrtnuľa by mala byť bezpečná a spoľahlivá. Uchytenia listov ku náboju vrtnule by mali byť odolné voči ťahu spôsobenému odstredivou silou. Uchytenia vrtnule k motoru by mali byť realizované skrutkami tak aby sa dala vrtnuľa jednoducho odmontovať a namontovať. Skrutky týchto uchytení musia byť dimenzované na maximálny ťah od vrtnule. Výstup z motora alebo z reduktora musí byť kompatibilný s možnosťami uchytenia náboja vrtnule. Kužeľ vrtnule musí mať dostatočnú aerodynamiku tak, aby jeho tvary plynulo prechádzali ku kapotáži motora. Vrtnuľa ako rotačné teleso musí byť vyvážená aby nevznikali nevyvážené odstredivé sily jednotlivých listov.

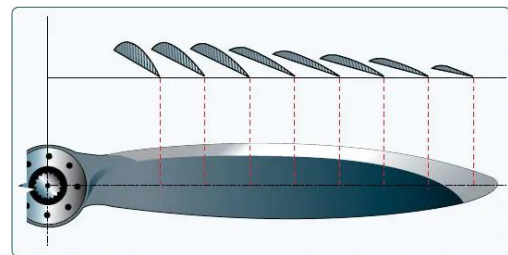
Ďalšími požiadavkami sú hmotnosť, účinnosť a ťah. Vrtnuľa by nemala byť príliš ťažká nielen kvôli celkovej hmotnosti a polohe ťažiska lietadla ale aj kvôli primeranému namáhaniu výstupu motora, ložísk a kľukovej hriadele. Požiadavky na účinnosť a ťah vrtnule závisia od vlastností motora. Čepele listov vrtnúľ by mali byť odolné aspoň voči nárazu častíc piesku a drobného štrku.



Obrázok 15: Konštrukcia vrtnule a jej časti. Zdroj: [8].

3.2. Princíp fungovania leteckej vrtnule

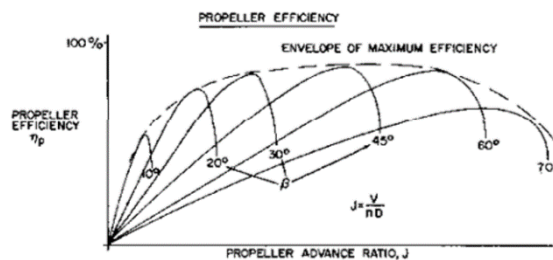
Princíp fungovania vrtnule spočíva v profile listov vrtnule, ktoré vytvárajú vztlak. Tieto profily totiž pri rotácii obtekajú vzduch zo smeru letu a kolmo na čap vrtnule. Jednotlivé prúdnice obtekajú list vrtnule pod určitým uhlom nábehu. Uhol nastavenia priamo ovplyvňuje uhol nábehu listu voči prúdniciam. Avšak uhol nábehu je meraný medzi priamkou spájajúcou odtokovú a nábežnú hranu a vodorovnou osou. Uhol nastavenia je uhol medzi priamkou lemujúcou spodnú časť profilu listu a vodorovnou osou. Profil listu vrtnule je rozmanitý a spolu s tetivou a uhlom nastavenia sa mení postupom celej dĺžky listu a vytvára tak skrútenie listu.



Obrázok 16: Skrútenie vrtnule. Zdroj: [9].

Pri koreni býva profil hrubý a elipsovitý s vysokým (tupým) uhlom nastavenia, pretože pri pracovných otáčkach pretekajú prúdnice v tejto časti listu pomaly. Približne od 25% dĺžky po 75% dĺžky je profil vrtnule stredne hrubý až štíhly. Táto časť vrtnule produkuje počas pracovných otáčok najväčší vztlak, ktorým vytvára väčšinu do predného ťahu. Posledná štvrtina dĺžky listu je tvorená štíhlym profilom, a takmer nulovým uhlom nastavenia kvôli prúdeniu vzduchu nadzvukovou rýchlosťou. So vzdialenosťou od stredu sa totiž rýchlosť listov zväčšuje. Špičky listov sú zaoblené tak aby nevznikalo turbulentné vírenie ktoré by spôsobovalo vibrácie.

Tetiva profilu listu sa zväčšuje plynulo od koreňa po 75% dĺžky listu. Za tromi štvrtinami sa tetiva zmenšuje až po špic listu vrtnule. Výrobcovia vrtnúľ udávajú parametre ako uhol nastavenia, v 75% dĺžky listov. Ďalšími parametrami od výrobcu by mali byť hmotnosť, charakteristiky ťahu a účinnosti, a pracovné otáčky. Čím väčší je uhol nastavenia, tým je vrtnuľa menej efektívna v stacionárnej polohe a lietadlo potrebuje dlhšiu vzletovú dráhu. Avšak pri veľkom uhle nastavenia je vrtnuľa účinná pri väčších vzdušných rýchlostiach a lietadlo dosiahne vďaka tomu vyššiu maximálnu rýchlosť a dostup.



Obrázok 17: Priebehy účinností vrtule pri rôznych uhloch nastavenia.
Zdroj: [6].

Vrtule stálych otáčok dokážu uhol nastavenia meniť počas každej fázy letu. Pri vzlete sa listy posunú tak aby mali čo najmenší uhol nastavenia, vďaka čomu má vrtuľa väčší ťah zo stacionárnej polohy. Následne sa listy pootáčajú pomocou hydraulického systému alebo elektrického servo systému plynulo po najvyšší uhol nastavenia v závislosti na vzdušnej rýchlosti. Vďaka tomu má vrtuľa ťah aj vo vyšších rýchlostiach alebo v riedkej atmosfére.

Podakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky KEGA 048ŽU-4/2020 s názvom "Zvyšovanie kľúčových kompetencií v oblasti technológie údržby lietadiel prostredníctvom transferu progresívnych metód do vzdelávacieho procesu".

Referencie

- [1] <https://donkiespeed.nl/d8-audi-1-8-t-dry-sump-lubrication-system-explained/>
- [2] <https://www.flexfuel-company.es/sistema-lubricacion-funcionamiento-descarbonizacion/>
- [3] <https://docplayer.gr/106370375-Technologia-oprav-automobilov.html>
- [4] <https://www.volkswagenblog.sk/5w30-co-zahadne-oznacovanie-olejov-vysvetlene>
- [5] F2-DP-2019-Havlik-Marek-DP.pdf
- [6] 30309302.pdf
- [7] <http://www.woodcomp.cz/in-flight-adjustable-propellers/>
- [8] Installation_Instructions_Composite_Aircraft_2_Blade_Lycoming_2G0_Instructions_1418054067
- [9] <https://www.flightliteracy.com/basic-propeller-principles-part-one/>