



# ANALYSIS OF TECHNICAL MODIFICATIONS TO ENABLE COMBUSTION OF GASEOUS FUEL IN A TURBOSHAFT ENGINE

**Matej Remšík**  
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

*The aim of this article is to investigate the feasibility of modifying turboshaft engines for gaseous fuel combustion. With growing concern for environmental sustainability and oil price volatility, there has been an increase in need for alternative fuels with gaseous fuels emerging as a potential alternative for traditional hydrocarbon liquid fuels. This article examines the technical modifications required to enable combustion of gaseous fuels in a conventional turboshaft engine, including changes to the combustion chambers, importance of flame stabilization and also provides an insight into the potential benefits and challenges of such changes to the turboshaft engines.*

## Keywords

*turboshaft engine, gaseous fuels, modifications, technical changes*

## 1. Úvod

Letecká doprava, podľa Medzinárodnej organizácie pre civilné letectvo, sa podieľa 2% na celkovej produkcii emisií CO<sub>2</sub> spaľovaním leteckých palív v lietadlových pohonných jednotkách. Táto skutočnosť sa v posledných rokoch stáva opodstatnenou obavou o budúcnosť planéty a dôvodom, prečo spoločnosť volá po znížení emisií a zvýšení udržateľnosti leteckého priemyslu. Popri environmentálnych dopadoch na klímu, záujem o zníženie závislosti na fosílnych palivách od východných dodávateľov ako blízky východ a Rusko predstavuje ďalší z dôvodov pre potrebu alternatívnych zdrojov energie.

Alternatívne plynné palivá ponúkajú sľubné parametre pre náhradu konvenčných palív leteckých turbínových motorov. Jeden z predmetov tohto článku je preskúmať možnosti v odvetví plyných palív použiteľných v leteckej doprave. Pochopenie odlišných vlastností a parametrov rôznych palivových alternatív je potrebné pre samotné chápanie efektu, ktorý bude používaním takýchto palív pôsobiť na činnosť pohonných jednotiek. Od preskúmania účinkov alternatívnych plyných palív na časti pohonnej jednotky sa budú odvíjať aj potrebné technické modifikácie daných komponentov.

Cieľom tohto článku je analyzovať technické riešenia turbohriadeľových motorov, schopných práce s plynými alternatívami k tradičným JET palivám, používaných nielen v letectve. Nadobudnuté poznatky budú následne využité k návrhu modifikácií pre letecký turbohriadeľový motor.

## 2. Princíp činnosti turbínového motora

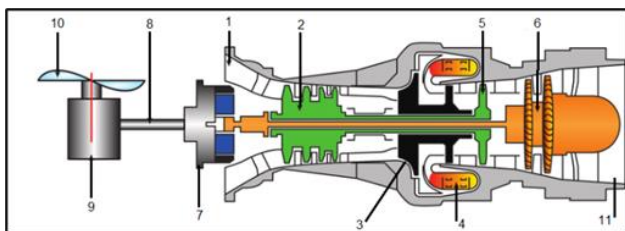
### 2.1. Princíp činnosti turbínového motora

Turbínový motor je tepelný stroj, ktorý premieňa chemickú energiu obsiahnutú v palive na ťahovú silu, využitú, napríklad, pre pohon letúnov. Premena chemickej energie paliva na energiu mechanickú či kinetickú prebieha spaľovaním palivo-

vzduchovej zmesi v spaľovacej komore. Využitie turbínového motora v letectve má základ v urýchľovaní prúdu vzduchu vstupujúceho do motora na jeho výstupe, avšak táto práca sa venuje najmä motoru turbohriadeľovému, pri ktorom má efekt urýchľovania vzduchu priamo vo vnútri motora minimálny podiel na tvorbe výsledného ťahu. Turbohriadeľový motor pre tvorbu ťahu spravidla roztáča vrtuľu cez reduktor otáčok (turbovrtuľový motor) alebo rotory vrtuľníka pomocou prevodovky, no princíp premeny energie paliva sa zachováva.

### 2.2. Základné časti turbohriadeľového motora

Prvou časťou turbohriadeľového motora je vstupné ústrojenstvo. Ako už aj názov napovedá, cez toto ústrojenstvo vstupuje vzduch do vnútra motora, odkiaľ postupuje ďalej do kompresora. V kompresore dochádza ku kompresii, teda stlačeniu, vzduchu na požadovanú hodnotu tlaku. Stlačený vzduch následne cez difúzor kompresora vstupuje do spaľovacej komory, kde sa zmiešava so vstrekovaným palivom a táto zmes sa následne kontinuálne spaľuje. Spaľovacia komora je pre potreby tohto článku najdôležitejšia časť turbohriadeľového motora. Ďalej sú horúce plyny privádzané do plynovej turbíny, kde expandujú a roztáčajú rotory jednotlivých stupňov turbíny. Plynová turbína spotrebúva energiu plynov na pohon kompresora, ako aj vrtule alebo rotora vrtuľníka cez voľnú plynovú turbínu. Prúd plynu postupuje k poslednej časti, ktorá sa nazýva výstupné ústrojenstvo, cez ktoré plyn opúšťa motor. [1]



Obrázok 1 - Základné komponenty turbohriadeľového motora (1 – Vstupné ústrojenstvo, 2 – Kompresor, 3 – Difúzor, 4 – Spaľovacia komora, 5 – Plynová turbína, 6 – Voľná plynová turbína, 7 – Reduktor otáčok, 8 – Výstupný hriadeľ, 9 – Prevodovka, 10 – Rotor, 11 – Výstupné ústrojenstvo) [2]

### 2.3. Konvenčné palivá turbínových motorov

Vo všeobecnosti sa v civilnom letectve ako palivá v turbínových motoroch používajú letecké petroleje (letecké kerozíny). Letecký kerozín sa získava ako produkt frakčnej destilácie ropy. Pre dosiahnutie požadovaných vlastností a kvalít sa do paliva pridávajú vhodné aditíva. Palivové aditíva majú za úlohu, okrem iného, zabezpečiť zníženie obsahu vody v palive, antibakteriálne, antifungicídne či protikorózne účinky. V prevádzke sa bežne využívajú palivá s názvom JET A (pre americký trh) a JET A-1 (vyskytujúci sa skôr v európskych oblastiach). V špeciálnych prípadoch, najmä pre operácie v extrémne chladných podmienkach, sa pre svoje lepšie vlastnosti pri nízkych teplotách používa palivo JET B.

Tabuľka 1 sa zaoberá základnými vlastnosťami palív JET A-1 a JET A ako hustota, rýchlosť horenia a energetický obsah palív. Vlastnosti špecifikované v tabuľke budú neskôr dôležité v porovnaní s rovnakými charakteristikami alternatívnych plynných palív. [3]

Tabuľka 1 - porovnanie vlastností jet palív [4]

	JET A-1	JET A
Hustota [kg/L]	0,804	0,820
Špecifická energia [MJ/kg]	43,15	43,02
Energetická hustota [MJ/L]	34,7	35,3
Rýchlosť horenia [m/s]	0,44	

## 3. Potreba alternatívnych zdrojov energie

### 3.1. Ekonomické a sociologické dôvody

Letecký dopravný priemysel je výrazne závislý na pohonných hmotách na báze ropy, ktorá je predmetom volatility a vo výnimočných prípadoch výkyvom dodávok tejto suroviny. Globálna politická situácia dokáže negatívne ovplyvniť cenu a dostupnosť pohonných hmôt, respektíve ropy. Už v roku 1973 sa ukázalo, že napríklad vojnové konflikty môžu mať za následok celosvetovú, tzv. ropnú, krízu. V období ropnej krízy v roku 1973 sa ceny ropy za jeden barel zvýšili až o 400% a vývoz ropy do štátov západnej Európy ako aj do USA bol zakázaný. Závislosť na rope hlavne z blízkeho východu a Ruska a schopnosť nepredvídateľných udalostí ovplyvňovať svetovú ekonomiku by

sa teda dala považovať za riziko a za dôvod pre menej náchylnú alternatívu. Diverzifikácia zdrojov pohonných hmôt, napríklad o plynné palivá, môže znížiť celkovú závislosť na fosílnych palivách a rovnako aj podporiť domácu produkciu obnoviteľných zdrojov energie.

### 3.2. Ekologické dôvody

Popri dostupnosti a cene ropy je však jeden z najsilnejších argumentov pre rozvoj v odvetví alternatívnych palív ekologický dopad spaľovania fosílnych palív. Spaľovanie uhľovodíkových zlúčenín v motoroch dopravných prostriedkov, teda lietadiel, produkuje množstvo skleníkových plynov ako oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>) a oxidy dusíka (NO<sub>x</sub>). Z globálneho hľadiska je letecká doprava producentom až 2% celkových emisií CO<sub>2</sub> a značným podielom prispieva ku klimatickým zmenám. Táto skutočnosť sa v posledných rokoch stala opodstatnenou obavou o budúcnosť a dôvodom, prečo spoločnosť volá po znížení emisií a zvýšení udržateľnosti leteckého priemyslu.

Preto sa objavuje čoraz väčšia snaha nájsť „zelenú“ alternatívu k tradičným palivám. Jednou z možností môže byť aj cesta plynných palív.

### 3.3. Technologický pokrok

Vývoj nových technológií v palivovom odvetví môže viesť k zvýšenej účinnosti a celkovému zlepšeniu výkonu leteckých motorov. Takýto technologický pokrok by teoreticky mohol znížiť prevádzkové náklady ako aj zlepšiť celkovú udržateľnosť a ekologickosť prevádzky spaľovacích jednotiek. Navyiac, alternatívne palivá otvárajú dvere novým technickým a konštrukčným riešeniam pohonných jednotiek a ich komponentov.

Hľadanie plynných alternatívnych palív je, v zhrnutí, pre letectvo dôležité z dôvodu znižovania emisií, závislosti na fosílnych palivách a podpory celkovej inovácie v priemysle.

## 4. Plynné alternatívy

Medzi palivá vhodné na použitie v leteckých turbohriadeľových motoroch je možné zaradiť množstvo plynov. Najväčší potenciál použitia v reálnej prevádzke však má iba niekoľko z nich. V posledných rokoch prebiehajú diskusie najmä o potenciáli stlačeného zemného plynu (CNG), skvapalneného zemného plynu (LNG), skvapalneného ropného plynu (LPG) a v neposlednom rade vodíka (H).

V Tabuľke 2 sa nachádzajú základné parametre vyššie spomenutých plynných palív. Pri porovnaní daných parametrov s vlastnosťami leteckých petrolejov je možné nájsť podobnosti. Špecifická energia obsiahnutá v 1 kilograme CNG, LPG a JET palivách je porovnateľná. Palivá ako LNG a LH sú z tohto pohľadu omnoho atraktívnejšie, keďže špecifická energia vodíka je až takmer 3-násobne vyššia ako pri kerozíne. Veľmi dôležitým parametrom pri porovnávaní je hustota paliva, ktorá je vo všeobecnosti pri plynach nižšia ako pri palivách kvapalného skupenstva. Hustota ovplyvňuje aj energetickú hustotu paliva, ktorá je pri každej alternatíve v porovnaní s JET palivom nižšia, no kompenzuje ju nižšia hmotnosť, ktorú majú plyny práve vďaka svojej nízkej hustote. Pre účely leteckej dopravy je výhodnejšie plynné palivá skladovať v skvapalnenej podobe. Skvapalnenie sa dá dosiahnuť privedením plynu pod určitý tlak

(LPG) alebo do veľmi nízkych teplôt, kedy hovoríme o kryogénnych palivách. Medzi kryogénne palivá patrí LNG alebo skvapatnený vodík - LH. Celkovo je vodík z pomedzi ostatných palív veľmi špecifický, keďže sa skladá iba z jedného prvku a neobsahuje žiaden uhlík. Jeho jedinečné zloženie má za následok veľmi rýchle horenie pri vysokých teplotách. Rýchlosť horenia ostatných alternatív je veľmi podobná, no teplota horenia sa v porovnaní s JET A/A-1 mierne líši.

Tabuľka 2 - Parametre plyných palív [5] [6]

	CNG	LNG
Hustota [kg/L]	0,75x10 <sup>-3</sup>	0,421
Špecifická energia [MJ/kg]	45,8	50
Energetická hustota [MJ/L]	9,2	21
Rýchlosť horenia [m/s]	0,4	0,45
	LPG	LH
Hustota [kg/L]	0,510	0,708x10 <sup>-1</sup>
Špecifická energia [MJ/kg]	46	120
Energetická hustota [MJ/L]	25	8
Rýchlosť horenia [m/s]	0,45	2,4

Chápanie odlišností v parametroch palív je dôležité pri návrhu konkrétnych riešení palivovej sústavy, spaľovacej komory a ostatných komponentov turbohriadeľového motora.

## 5. Spaľovacia komora

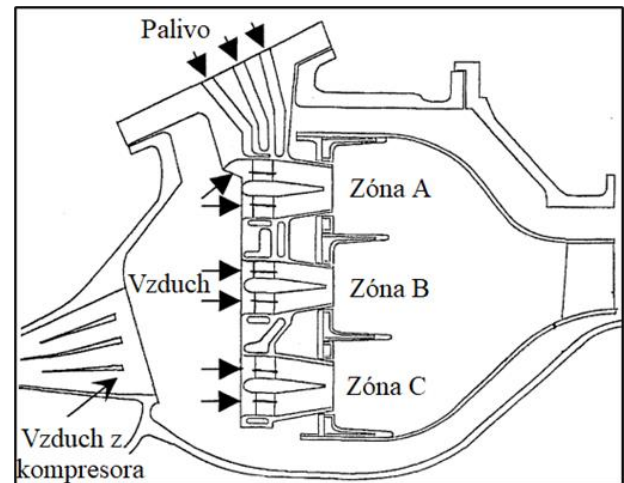
Pri výbere vhodnej spaľovacej komory je potrebné hľadiť najmä na rýchlosť a teplotu horenia daného paliva. Takmer všetky uhľovodíkové palivá, napríklad aj zemný či ropný plyn, pri horení neprekročia rýchlosť 0,45 m/s. Výnimkou je vodík, ktorého rýchlosť horenia je niekoľkonásobne vyššia s hodnotou 2,4 m/s. Keďže hlavným cieľom použitia plyných palív je zníženie emisií, je nutné hľadiť na teplotu horenia a dĺžku trvania spaľovacieho procesu v spaľovacej komore. Pre zníženie emisií (najmä NO<sub>x</sub>) je potrebné znížiť teplotu horenia a skrátiť čas horenia palivo-vzduchovej zmesi v komore. Vyššia rýchlosť horenia vodíka teoreticky umožňuje skrátenie dĺžky spaľovacej komory pre potreby znižovania emisií. Ako sekundárny efekt takéhoto riešenia je zníženie celkovej hmotnosti a rozmerov motora.

Široké rozmedzie pomerov palivo-vzduchovej zmesi, pri ktorých dokážu plyné palivá horieť, dovoľuje použitie špeciálnych spaľovacích komôr pre zníženie teploty horenia. Takéto komory sa nazývajú DLE (Dry Low Emission) alebo DLN (Dry Low Nox) a pracujú s vopred zmiešanou, ochudobnenou zmesou paliva so vzduchom, čím sa zníži teplota horenia a rovnako aj emisie. [7]

### 5.1. Technológia s viacerými spaľovačmi

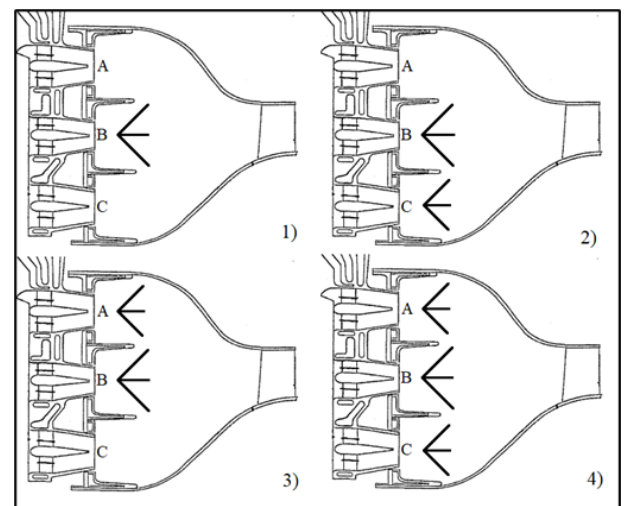
Technické riešenie, kde sa v spaľovacej komore nachádza viac spaľovačov (OBRÁZOK 2), funguje na princípe rozloženia jednej primárnej zóny horenia do viacerých menších zón, pričom každá

obsahuje svoj vlastný spaľovač. Každý z nich môže pracovať nezávisle na druhom, čo je výhodné, pretože turbohriadeľový motor pracuje v širokom rozmedzí pracovnej záťaže. Toto riešenie zabezpečuje nižšie teploty horenia v primárnych zónach horenia a tým zníženie emisií.



Obrázok 2 - Spaľovacia komora s viacerými zónami horenia [7]

Na OBRÁZKU 3 sú zobrazené rôzne pracovné módy spaľovacej komory s rozdelenou primárnou zónou horenia. Táto komora je schopná pracovať s každým spaľovačom zvlášť, nezávisle na ostatných. Pri nízkej záťaži je výhodné spaľovanie iba s jedným spaľovačom. Ak sa záťaž zvyšuje, postupne sa do chodu zapájajú aj ostatné. Pri použití takéhoto riešenia sa dosiahne zníženie emisií oxidov dusíka a oxidu uhoľnatého.

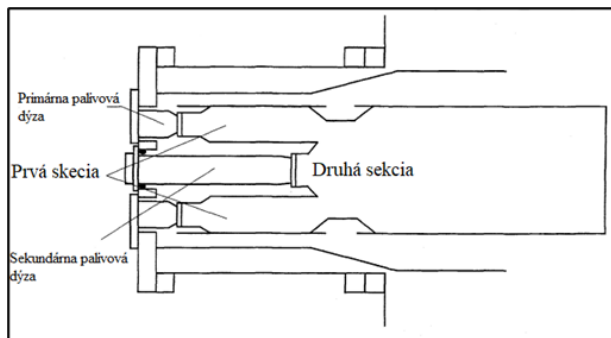


Obrázok 3 - Pracovné módy spaľovacej komory s viacerými zónami horenia [7]

### 5.2. Hybridné spaľovacie komory

Hybridné spaľovacie komory fungujú na princípe stupňovania spaľovania. OBRÁZOK 4 ukazuje zloženie spaľovacej komory z dvoch sekcií. Prvá sekcia zabezpečuje zmiešavanie paliva so vzduchom a spaľovanie tejto zmesi pri štartovaní alebo voľnobežných otáčkach motora. Nachádzajú sa v nej dva spaľovače. Ak sa záťaž motora zvýši, spaľovanie pokračuje aj v druhej sekcii s jedným spaľovačom, ktorá sa nachádza v smere

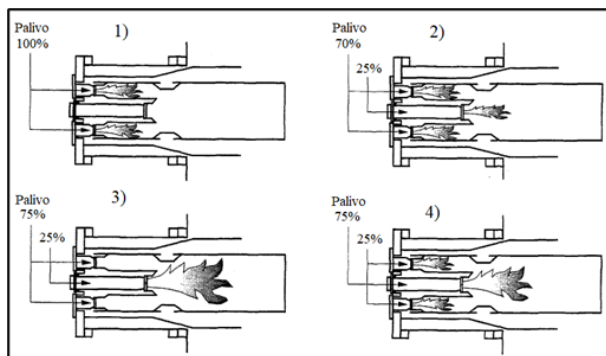
prúdenia z prvej sekcie. Použitie hybridnej spaľovacej komory znižuje emisie CO a NOx .



Obrázok 4 - Hybridná spaľovacia komora [7]

V OBRÁZKU 5 sú graficky znázornené pracovné módy hybridnej spaľovacej komory podľa pracovnej záťaže:

1. Primárny mód – Palivo-vzduchová zmes je spaľovaná iba v prvej sekcii a slúži na štart motora a chod pri voľnobežných otáčkach.
2. Lean-Lean mód – Palivo-vzduchová zmes je spaľovaná v primárnej aj sekundárnej sekcii. Slúži na chod motora do 70% max. zaťaženia.
3. Premixed mód – Zhruba 75% paliva je zmiešaných so vzduchom v primárnej sekcii, kde sa ale nezapáli a zmes prechádza ďalej k sekundárnej sekcii, kde prebieha spaľovanie ostatných 25% paliva. Celý proces horenia prebieha v sekundárnej sekcii. Používa sa pri záťaži motora od 70% do 100%.
4. Predĺžený Lean-Lean mód – Ak sa pri móde 3) plameň dostáva späť do primárnej sekcie, spaľovací proces sa stabilizuje podobným princípom ako v móde 2).



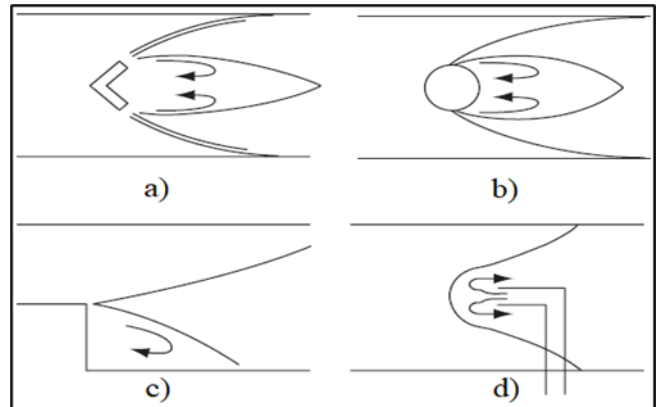
Obrázok 5 - Pracovné módy hybridnej spaľovacej komory [7]

## 6. STABILIZÁTORY PLAMEŇA

Ako už bolo spomenuté v predošlej kapitole, rýchlosť horenia uhľovodíkových palív je zriedkavo vyššia ako 0,45 m/s. V realite však plyny v spaľovacích komorách môžu dosiahnuť rýchlosti blížiacim sa 50 m/s. Pri spaľovaní palivo-vzduchovej zmesi v spaľovacích komorách turbínových motorov musí platiť, že rýchlosť prúdenia takejto zmesi je nižšia, ako rýchlosť horenia. Ak by toto pravidlo nebolo dodržané, plameň by mohol byť prúdiacimi plynmi doslova sfúknutý (blow-off).

Zníženie rýchlosti prúdenia sa v praxi zabezpečí donútením časti plynov recirkulovať, čím sa plameň stabilizuje. Stabilizácia plameňa môže byť dosiahnutá viacerými prostriedkami:

1. Vložením pevných prekážok rôznych tvarov priamo do prúdu plynov,
2. nasmerovaním časti prúdiacich plynov alebo vzduchu proti smeru prúdenia,
3. zapracovaním schodu do konštrukcie spaľovacej komory, kde dochádza k náhlej expanzii plynov.



Obrázok 6 - Metódy stabilizácie plameňa

Na OBRÁZKU 6 sú znázornené konkrétne riešenia stabilizácie horenia v spaľovacích komorách. Možnosť a) je pevná prekážka v tvare „V“. Možnosť b) je pevná prekážka s kruhovým prierezom (stabilizačná tyč). Oboje sú vložené priamo do prúdiacich plynov, ktoré sa po prejdení za prekážku víria. Možnosť c) znázorňuje riešenie s použitím schodu priamo v konštrukcii spaľovacej komory, za ktorým dochádza k náhlemu rozpínaniu plynov, čo sprevádza vírenie a zníženie ich rýchlosti. Ako posledná je na obrázku znázornená možnosť d), kde je proti smeru prúdiacich plynov nasmerovaná dýza, cez ktorú prúdi časť sekundárneho prúdu vzduchu, ktorý stabilizuje horenie. [6]

## 7. Záver

Článok sa zaoberal technickými modifikáciami, ktoré by v teórii dovoľovali turbohriadeľovému motoru spaľovať plyné palivá. Zdôraznené boli najmä ekologické dôvody hľadania alternatívnych palív pre letectvo, kde sa plyné palivá ukazujú ako atraktívna možnosť. Zároveň boli zhodnotené parametre niektorých palív, ktoré sú dôležité pri návrhu technického riešenia. Ďalej sa v článku nachádzajú návrhy konkrétnych modifikácií spaľovacích komôr a vysvetlenie ich činnosti. V poslednom rade sú spomenuté možnosti stabilizácie horenia v spaľovacích komorách.

Je však nutné podotknúť, že by bol potrebný ďalší výskum, ktorý by vyriešil problematiku ostatných komponentov turbohriadeľového motora, medzi ktoré sa dajú zaradiť palivové čerpadlá, potrubia a dýzy a turbínová sekcia motora.

## Referencie

- [1] KŘÍŽ, J. 2008. Pohonná jednotka. Žilina: EDIS –
- [2] vydavateľstvo, 2008. ISBN 978-80-8070-872-6

- [3] ResearchGate | Find and share research [online] Dostupné na: [https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-turbo-shaft-engine\\_fig1\\_337552918](https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-turbo-shaft-engine_fig1_337552918)
- [4] ŠKULTÉTY, F. Katedra leteckej dopravy FPEDAS UNIZA, Univerzitná 8215/1, Žilina. Palivové systémy
- [5] Air BP. 2000. Handbook of Products. Hemel Hempstead. 2000.
- [6] Century Fuel Products. Fuel Characteristics. [online] Dostupné na: [https://www.centuryfuelproducts.com/media/schematics/Fuel\\_Characteristics.pdf](https://www.centuryfuelproducts.com/media/schematics/Fuel_Characteristics.pdf)
- [7] GLASSMAN, I. – YETTER, R. A. 2008. Combustion. 4. vyd. California: Elsevier, 2008. 773 s. ISBN 978-0-12-088573-2
- [8] STEINMANN. 1997. *Low NO<sub>x</sub> Burners for Major Gas Turbine Installations – Technology and Experience*. Bergen. 1997.