

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA DOPRAVNÍ**

Garri Takmazyan

**OPTIMALIZACE PROVOZU MALÝCH LETADEL  
POMOCÍ MONITOROVÁNÍ PARAMETRŮ MOTORŮ**

Bakalářská práce

**2018**



**K621..... Ústav letecké dopravy**

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Garri Takmazyan**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**B 3710 – PIL – Profesionální pilot**

Název tématu (česky): **Optimalizace provozu malých letadel pomocí monitorování parametrů motorů**

Název tématu (anglicky): Optimization of the Commuter Aircraft Operation by Engine Monitoring System

**Zásady pro vypracování**

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Malá dopravní letadla a jejich motory
- Monitorování parametrů leteckých motorů
- Model aktuálního stavu motoru
- Optimalizace provozu malých letadel



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Certifikační specifikace CS-23  
Diagnostika leteckých motorů v podmínkách provozu místní letecké dopravy  
Reliability: Modeling, Prediction, and Optimization

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Kateřina Kunčíková**  
**Ing. Jakub Kraus, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **1. října 2018**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **30. listopadu 2018**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu letecké dopravy



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

.....  
Garri Takmazyan  
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 1. října 2018

## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro zpracování této práce. Zvláště pak děkuji Ing. Jakub Kraus, Ph.D. za odborné vedení a konzultování bakalářské práce a za rady, které byly poskytovány po celou dobu mého studia. Dále bych chtěl poděkovat slečně Ing. Kateřina Kunčíková za umožnění přístupu k mnoha důležitým informacím a materiálům.

Nakonec bych rád poděkoval svým rodičům a blízkým za podporu a pochopení v průběhu celého studia, kterého si velice vážím.

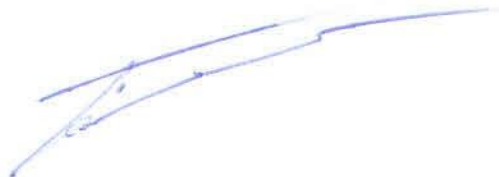
## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

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

V Praze dne 30. listopadu 2018



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

OPTIMALIZACE PROVOZU MALÝCH LETADEL POMOCÍ  
MONITOROVÁNÍ PARAMETRŮ MOTORŮ

**ABSTRAKT**

Předmětem bakalářské práce “Optimalizace provozu malých letadel pomocí monitorování parametrů motorů” je analyzovat současný stav parametrů leteckých motorů a na základě této analýzy vytipovat vhodný způsob aplikace monitorování parametrů motorů pro optimalizaci provozu malých dopravních letadel.

**ABSTRACT**

The subject of the bachelor thesis „Optimization of the Commuter Aircraft Operation by Engine Monitoring Parameter“ is analysis of the current state of aircraft engine parameters and selection on the basis of this analysis the suitable method of monitoring an engine parameter for commuter aircraft operation optimization.

**Klíčová slova**

Diagnostika, letecký motor, L – 410 Turbolet, malá dopravní letadla, monitorování parametrů motorů, optimalizace.

**Key words**

Diagnostics, aircraft engine, L – 410 Turbolet, commuter aircraft, engine monitoring system, optimization.

# Obsah

Obsah.....	5
Seznam použitých zkratek .....	7
Úvod .....	10
1 Malá dopravní letadla a jejich motory .....	11
1.1 Letoun .....	11
1.1.1 Dopravní letadlo .....	11
1.1.2 Certifikační specifikace CS-23.....	12
1.2 Letecký motor.....	13
1.2.1 Motory malých dopravních letadel.....	14
1.2.2 Částí pohonné jednotky.....	15
1.3 Princip fungování motoru .....	18
2 Monitorování.....	20
3 Detekce a izolace poruch .....	22
3.1 Modelová metoda .....	22
3.2 Signálová metoda .....	23
3.3 Diagnostika poruch stroje.....	24
4 Palubní diagnostika.....	26
4.1 Adaptivní výkonnostní model v reálném čase .....	27
4.1.1 Volba modelu ladění parametrů motoru.....	28
5 Monitorování parametrů leteckých motorů .....	29
5.1 Systémy pro sběr dat.....	32
5.2 Monitorované parametry .....	34
5.3 EGT - Teplota výfukových plynů.....	34
5.3.1 Obnova EGT.....	36
5.3.2 Základní model a sledování .....	37
5.3.3 Zjišťování zhoršení výkonu .....	39
6 Porovnání možností sběru dat u malých a velkých dopravních letadel .....	40
6.1 L – 410 Turbolet .....	40
6.2 Airbus A320 .....	44
6.3 Porovnání vybavení letounu A320 s letounem L410 .....	46
6.4 SWOT analýza .....	49
6.4 Zpracování dat .....	52

7 Závěr .....	54
8 Použité zdroje.....	56
8.1 Literatura.....	56
8.2 Internetové zdroje .....	56
9 Seznam obrázku .....	58
10 Seznam tabulek .....	59

## Seznam použitých zkratk

ACARS	Aircraft Communications Addressing and Reporting System	Letadlový komunikační adresní a oznamovací systém
ACMS	Aircraft Condition Monitoring System	Systém sledování stavu letadla
AIDS	Aircraft Integrated Data System	Integrovaný datový systém letadla
APU	Auxiliary Power unit	Pomocná energetická jednotka
CFDS	Centralized Fault Display System	Palubní monitorovací system
ECM	Engine Condition Monitoring	Monitorování stavu motoru
EGT	Exhaust Gas Temperature	Teplota výfukových plynů
EPR	Engine pressure ration	Poměr tlaku motoru
FDI	Fault detection and isolation	Detekce a izolace poruch
FDIR	Fault detection, isolation, and recovery	Detekce poruch, izolace a obnovení
FDR	Flight Data Recorder	Záznamník letových údajů



FDRS	Flight Data Recording System	System záznamu letových dat
FF	Fuel Flow	Průtok paliva
FFT	Fast Fourier Transform	Rychlá Fourierova transformace
GE	General electric	General electric
HF	High frequency	Krátké vlny
HT	Hard-Time Maintenance	Pravidelná inspekce
N1	Low-pressure Fan Speed	Nízkotlaká rychlost dmychadla
OBD	On-board diagnostic	Palubní diagnostika
OC	On-Condition Maintenance	Periodická inspekce
PCA	Principal component analysis	Certifikační úřad
PLA	Power lever angle	Úhel výkonové páky
RPM	Revolutions Per Minute	Otáčky za minutu

RTAPM	Real-time adaptive performance model	Adaptivní výkonnostní model v reálném čase
VHF	Very high frequency	Velmi krátké vlny

# Úvod

Bakalářská práce je věnována problematice monitorování parametrů motorů. Jedná se o velmi složitý a náročný proces. Monitorování parametrů motorů zahrnuje sběr motorových dat i jejich následné zpracování.

Provozovatelé velkých dopravních letadel sbírají a vyhodnocují letová data nepřetržitě během celého letu. U malých dopravních letadel by však tato metoda byla velice nákladná a pro mnoho provozovatelů nedosažitelná. Je proto aktuální snahou výrobců motorů a provozovatelů malých dopravních letadel zaměřit se na možnost využití dostupných dat.

Bakalářská práce je rozdělena na dvě hlavní části. První teoretická část, která obsahuje popis malého dopravního letadla, popis turbovrtulového motoru a větší prostor je věnován samotné problematice monitorování parametrů motoru. Zároveň obsahuje popis procesu monitorování na příkladu velkých dopravních letadel.

Ve druhé, praktické části jsou zvoleny a porovnány dva letouny, jeden zástupce z kategorie malých dopravních letadel, kterým je L-410 a jeden zástupce velkých dopravních letadel, Airbus A320. Oba letouny jsou porovnány z pohledu jejich vybavení týkajícího se možného monitorování parametrů motoru a pomocí SWOT analýzy jsou ukázány výhody a nevýhody zavedení systému monitorování u malého dopravního letadla.

Předkládaná práce má za cíl popsat problematiku monitorování parametrů leteckých motorů u malých dopravních letadel, navrhnout možná zlepšení sběru dat a tím přispět k optimalizaci jejich provozu.

# 1 Malá dopravní letadla a jejich motory

V této kapitole bude vysvětlen pojem dopravní letadlo, Certifikační specifikace CS – 23, a následně jeden z typických motorů, který se používá u menších dopravních letadel certifikovaných podle CS - 23. Všechny tyto body jsou zásadní pro pochopení celé problematiky práce.

## 1.1 Letoun

Letoun je motorové letadlo těžší než vzduch, které používá ke svému pohybu aerodynamické síly, s pevnými nosnými plochami.

### 1.1.1 Dopravní letadlo

Dopravní letadlo, je těžší než vzduch s pohonem, vyvozující vztlak za letu hlavně z aerodynamických sil na plochách, které za daných podmínek letu zůstávají vůči letadlu nepohyblivé. [3]

Letadla se rozdělují do různých kategorií. Nejčastější rozdělení je podle jejich rozměrů.

Největšími letadly jsou velkokapacitní letadla: nad 200 cestujících. Tato letadla se obvykle používají pro dálkové lety. Příkladem mohou být Airbus A380 a Boeing 747.

Menší, a také běžnější třídou jsou velká dopravní letadla: 100 až 200 cestujících. Tato letadla se obecně používají pro lety na krátké až středně dlouhou trať. Příkladem mohou být Airbus A320 a Boeing 737. [3]

Regionální letadla obvykle přepravují méně než 100 cestujících. Regionální trasy pak vytvářejí paprsky modelu letecké dopravy typu hub-and-spoke. Příkladem mohou být ATR 42, ATR 72 a Bombardier Dash 8.

Nejlehčí letouny, které mají 19 nebo méně sedadel pro cestující, se nazývají „commuter aircraft“ (překlad do češtiny: „malé dopravní letadlo“). Příkladem je L-410.

Práce je zaměřena na nejlehčí letouny. Jako hlavní místa využití těchto letounů můžeme uvést oblast Sibiře v Rusku, rozsáhlé oblasti v Austrálii či Africe. V našich infrastrukturních

podmínkách letecká doprava tohoto rozsahu, v dnešní ekonomické situaci, není rentabilní. Letouny této kategorie se soustředí na vzlety a přistání z nezpevněných ploch a letišť se špatným nebo dokonce žádným technickým zázemím. [3]

### 1.1.2 Certifikační specifikace CS-23

Předpis je odvozený z ICAO annex 8 – Airworthiness of aircraft (překlad do češtiny: „Letová způsobilost letadla“). ICAO annex 8 je přeložen do Českého jazyka jako Letecký předpis 8 – L8 – Letová způsobilost letadel. CS-23 se vztahuje na letouny kategorie normální, cvičná a akrobatická, popisuje kompletní návrh letadla.

CS-23 se rozděluje do dvou částí. Část první, je předpis letové způsobilosti, do popisu kterého patří let, návrh a konstrukce, pohonná jednotka a vybavení letadla. Část druhá, popisuje přijatelné způsoby průkazu (AMC).

Certifikační specifikace říká, že tento předpis letové způsobilosti platí pro:

*„Letouny v kategorii normální, cvičná a akrobatická v uspořádání s devíti nebo méně sedaly mimo sedadla pilotů, se schválenou maximální vzletovou hmotností 5 670 kg (12 500 lb) nebo nižší, a vrtulové dvoumotorové letouny v kategorii pro sběrnou dopravu v uspořádání s devatenácti nebo méně sedadly mimo sedadla pilotů, se schválenou maximální vzletovou hmotností 8 618 kg (19 000 lb) nebo nižší.“ [6]*

Aby letadlo mohlo být uvedeno do provozu, potřebuje projít certifikačním procesem. Proces schvalování má na starosti certifikační úřad – PCA (Principal component analysis), ve státech EU to je Evropská agentura pro bezpečnost letectví EASA (European Aviation Safety Agency), pro USA to je FAA (Federal Aviation Administration).[6]

Každý turbínový motor musí vyhovovat CS E-790 a CS E-800, nebo musí být prokázáno na základě předcházejících zkušeností z provozu s podobným umístěním zástavby, že případné nasátí cizího předmětu nemělo za následek nebezpečnou situaci. [6]

Pro zástavby turbínových motorů platí že turbínový motor musí být navržen tak, aby v případě poruchy rotoru motoru, nebov případě požáru uvnitř motoru, který prohoří vně skříně motoru, bylo sníženo nebezpečí pro letoun na minimum. Soustavy pohonné jednotky

související s ovládacími zařízeními motoru, systémy a přístroje musí být navrženy tak, aby poskytovaly dostatečnou jistotu, že ta provozní omezení motoru, která nepříznivě ovlivňují integritu konstrukce turbínového motoru, nebudou v provozu překročena.

Pohonné jednotky musí být uspořádány a navzájem izolovány tak, aby umožňovaly provoz alespoň v jedné konfiguraci tak, aby porucha nebo nesprávná činnost kteréhokoliv motoru nebo porucha nebo nesprávná činnost (včetně zničení ohněm v motorovém prostoru) kteréhokoliv systému, které by mohly ovlivnit motor nezabránilo pokračování bezpečného chodu zbývajících motorů, nebo nevyžadovaly okamžitý zásah některého člena posádky pro zajištění dalšího bezpečného chodu zbývajících motorů. [6]

Zástavba turbínových motorů musí vyhovovat následujícím požadavkům. Konstrukce zástavby musí být provedena tak, aby bylo sníženo na minimum nebezpečí vzniku požáru nebo mechanického poškození motoru nebo letounu v důsledku spouštění motoru za všech podmínek, za kterých má být spouštění povoleno. Jakékoliv postupy a příslušná omezení musí být stanoveny v letové příručce nebo na příslušných provozních štítcích. Musí být k dispozici prostředky umožňující zastavení spalování a rotace kteréhokoliv motoru, jehož pokračující rotace by mohla vyvolat nebezpečnou situaci pro letoun. Každá součást systému pro zastavení motoru umístěná v požární zóně musí být žáruvzdorná. Je-li pro zastavení motoru použit hydraulický systém praporování vrtule, musí být příslušné potrubí nebo hadice žáruvzdorné. Musí být možné opětovné spuštění kteréhokoliv motoru za letu. Jakékoliv postupy a příslušná omezení musí být stanoveny a uvedeny v letové příručce nebo na příslušných provozních štítcích. Musí být předvedeno za letu, že při opětovném spouštění motorů po neúspěšném spouštění je všechno palivo nebo výpary vypouštěno takovým způsobem, při kterém nevznikne nebezpečí požáru. [6]

## 1.2 Letecký motor

Letadlové motory slouží k pohonu letadel. Motor je stroj, který transformuje vstupní přivedenou energii na výstupní energii mechanickou. Podle způsobu produkce tahu rozlišujeme pohon: [5]

- I) Vrtulový
- II) Tryskový

Mezi vrtulové motory patří:

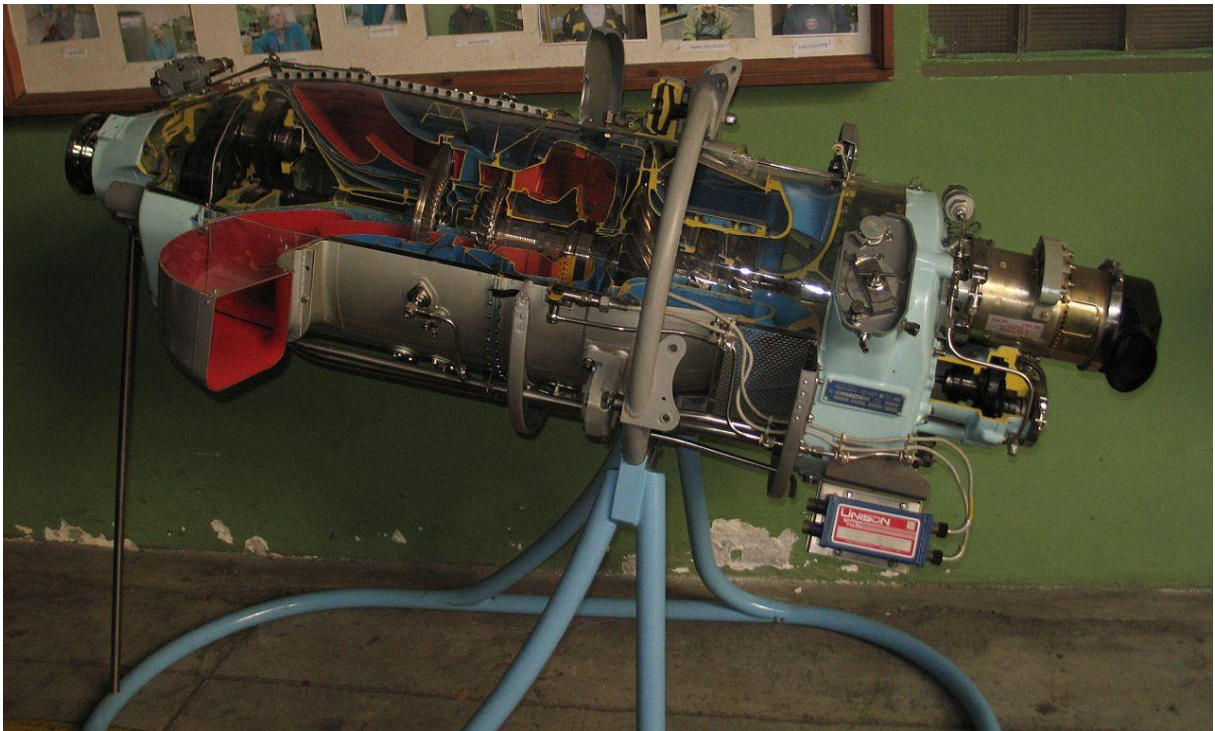
- I) Pístový motor – používá se pro malá sportovní nebo dopravní letadla
- II) Turbovrtulový motor – tento motor je vhodný pro menší letadla na regionální tratě

Do kategorie tryskových motorů patří:

- I) Proudový motor – příkladem letounu s proudovým motorem je Concorde, také tento typ motorů se využívá u stíhacích letounů
- II) Dvouproudový motor – používá se především u velkých dopravních letadel nebo u vojenských letadel
- III) Raketový motor – je výhodný pro dosažení nejvyšších rychlostí letu. Většinou se používá pro experimentální letadla nebo jako doplňkový pohon

### 1.2.1 Motory malých dopravních letadel

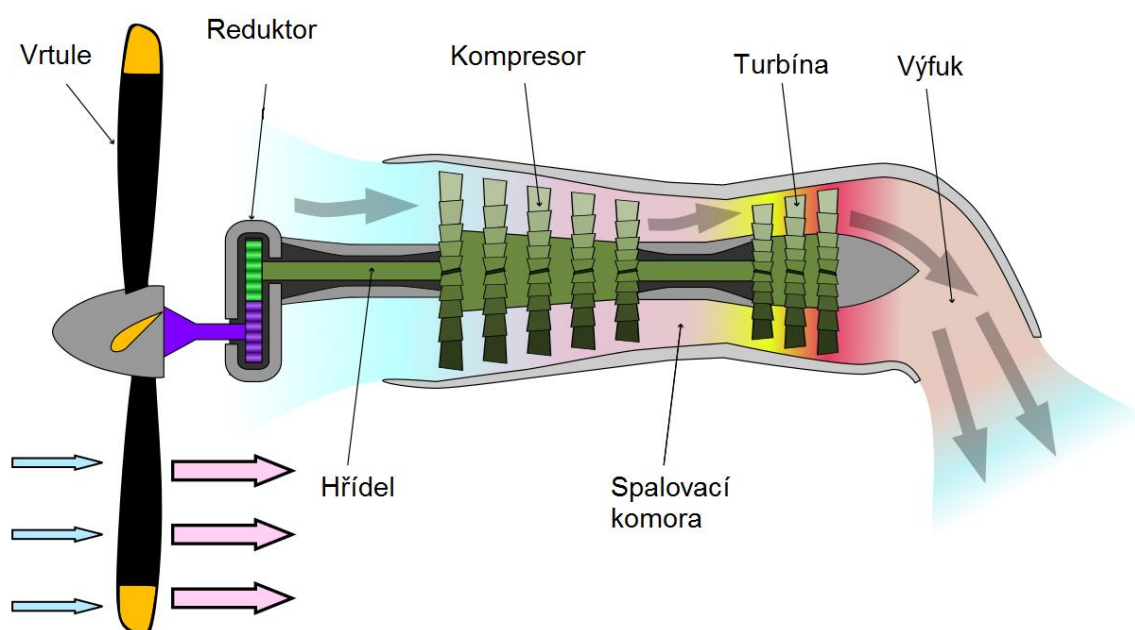
Většina malých dopravních letadel je poháněna vrtulovým motorem. Kvůli přenosu hnací síly prostřednictvím vrtule, jsou turbovrtulové motory vhodné pro malé letové rychlosti. Oproti jednoproudovým a dvouproudovým motorům, mají turbovrtulové motory lepší účinnost, a tedy nižší spotřebu paliva.



Obrázek 1 Turbovrtulový motor Walter M601 [12]

## 1.2.2 Částí pohonné jednotky

Turbovrtulový motor se dá považovat za hybrid vrtulového a proudového motoru – většina částí je stejná jako u proudového motoru: vstupní ústrojí, kompresor, spalovací komora, turbína, výstupní ústrojí. [1]



Obrázek 2 Schéma zobrazující činnost turbovrtulového motoru [14]

### Vrtule

Vrtule převádí rotační pohyb z motoru na tah nebo naopak tah na rotační pohyb, který převádí letadlo do pohybu. Vrtule může být pevná, ručně proměnná do několika nastavitelných poloh, nebo může být automaticky nastavitelného typu. Připevňuje se k hnacímu hřídeli zdroje energie buď přímo, nebo pomocí redukčního převodu.



Jsou vhodné pouze pro použití při podzvukových vzdušných rychlostech převážně pod úrovní rychlosti 770 km/h, jelikož uvedená rychlost se blíží k rychlosti zvuku a lokální nadzvukový proud způsobuje vysoké konstrukční namáhání. [1]

Účinnost vrtule je určena:

$$\eta = \frac{\text{hnací síla}}{\text{výkon na hřídeli}} = \frac{\text{tah} \times \text{axiální rychlost}}{\text{krouticí moment} \times \text{rychlost otáčení}}$$

Vrtule se dělí na pevné a stavitelné. Pevné mají listy nastaveny na pevný úhel nastavení, který je optimální pouze pro jeden režim letu, při kterém vrtule pracuje s nejvyšší účinností. Stavitelné vrtule se používají pro motory s vyšším výkonem, jsou schopny měnit úhel nastavení podle provozního režimu. Celková účinnost vrtule se tak výrazně zvyšuje. [1]



Obrázek 3 Letoun L-410, vrtule V 510 [18]

**Reduktor**

Reduktor je označení pro převodovku, která snižuje otáčky turbovrtulového motoru na otáčky určené pro optimální práci vrtule. Používá se u motorů s vysokým výkonem a vysokými otáčkami. [1]

Převod reduktoru je definován vztahem:

$$n = \frac{N_v \text{ (otáčky vrtule)}}{N_m \text{ (otáčky motoru)}}$$

## Kompresor

Kompresor je nezbytnou součástí. Kompresor je pracovní stroj, který je určen pro stlačování plynu. Kompresory dělíme na objemové a rychlostní. U objemových kompresorů je pohyb činné části stroje zejména přímočarý, jedná se převážně o pohyb pístu ve válci. Ke stlačování dochází pohybem pístu ve válci, který zmenšuje objem nasátého plynu. Rychlostní kompresory pracují na principu zvyšování kinetické energie nasávaného plynu. Zvýšená kinetická energie plynu je transformována na energii tlakovou. Mezi rychlostní kompresory patří lopatkové kompresory. Pokud je takový kompresor na společné hřídeli s turbínou, tak ho označujeme jako turbokompresor. Lopatkové kompresory dále můžeme dělit podle směru, jakým plyn do kompresoru vstupuje. Jsou to kompresory axiální, radiální a diagonální. [1]

## Spalovací prostor

Spalovací prostor je místo v motoru, kde se vznítí směs paliva se vzduchem. U proudových motorů, které nemají písty, ventily ani klikové ústrojí, a kde spalování probíhá nepřerušovaně, se obvykle hovoří o spalovací komoře, do níž se vhání proud silně stlačeného, a tedy horkého vzduchu. Do spalovací komory se zároveň vstříkuje palivo, kde se vznítí a spálí. Jeho spaliny jednak pohánějí hřídel vstupního kompresoru, jednak podle zákona akce a reakce vyvozují tah motoru. [1]

## Turbína

Plynová turbína je stroj, který mění mechanickou a tepelnou energii proudících plynů na mechanickou práci a roztáčí tak hřídel. Pracovní látkou jsou ohřáté plyny nebo spaliny,

vznikající v jiných částech motoru, přivedené do plynové turbíny. Plyny při průchodu turbínou odevzdají lopatkám svou kinetickou energii. [1]

### 1.3 Princip fungování motoru

Konstruktéři civilních letadel chtěli využít vysoký výkon a nízké náklady na údržbu, kterou nabízel motor s plynovou turbínou. Tak vznikla myšlenka spojit turbínový motor s tradiční vrtulí. Vzhledem k tomu, že plynové turbíny se otáčejí vysokou rychlostí, turbovrtulové motory mají reduktor pro snížení rychlosti hřídele, aby špičky vrtule nedosahovaly nadzvukové rychlosti. [2]

Ve své nejjednodušší formě je turbovrtulový motor tvořen ze sání, kompresoru, spalovací komory, turbíny a hnací trysky. Vzduch je nasáván a stlačován kompresorem. Palivo se pak přidává ke stlačenému vzduchu ve spalovacím zařízení, kde se směs spaluje a vypařuje. Horké spalovací plyny expandují přes turbínu. Část energie generované turbínou se používá k pohonu kompresoru. Zbytek se přenáší redukčním převodem na vrtuli. Další expanze plynů nastává v hnací trysce, kde se plyny odvádějí do atmosférického tlaku. Pohonná tryska poskytuje poměrně malý podíl tahu generovaného turbovrtulovým motorem. [2]

Výfukové plyny turbovrtulového motoru obvykle neobsahují dostatečnou energii, aby vytvořily významný tah, protože téměř celý výkon motoru se používá k pohonu vrtule.

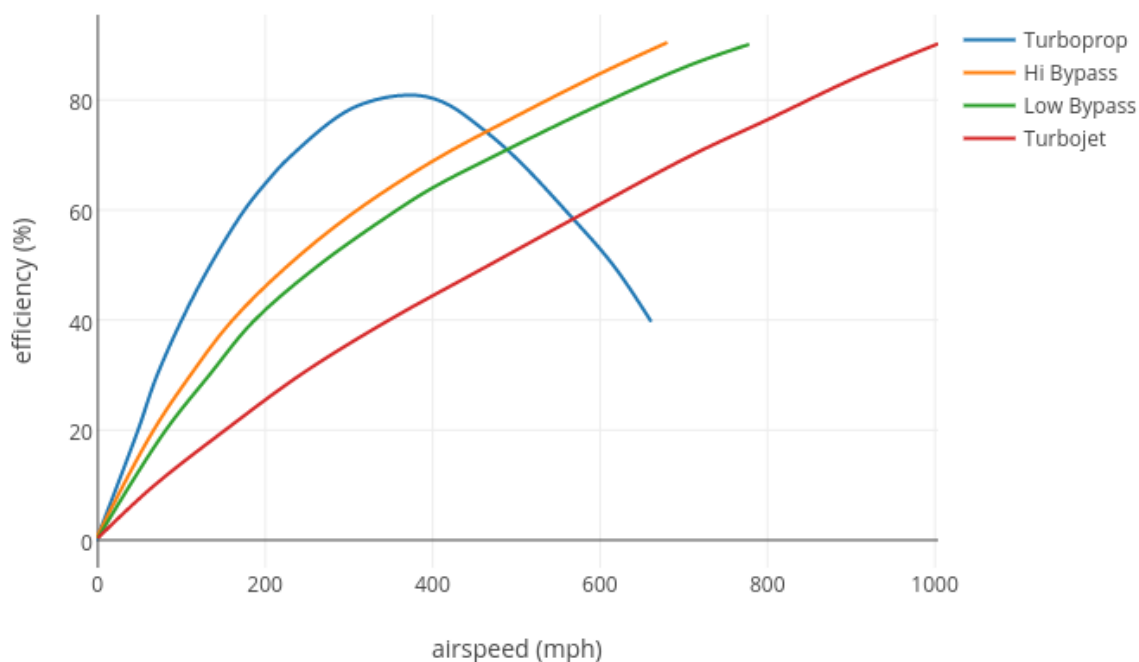
Vrtule je spojena s turbínou prostřednictvím redukčního převodového stupně, který přeměňuje vysoký výkon otáček / nízký kroutící moment na nižší otáčky / vysoký kroutící moment. Na rozdíl od lopatek s malým průměrem používaných v tryskových motorech je vrtule s velkým průměrem, který umožňuje zrychlení velkého objemu vzduchu. To umožňuje nižší rychlost proudění vzduchu pro dané množství tahu. Jelikož je efektivnější při nízkých rychlostech urychlit velké množství vzduchu o malý stupeň než malé množství vzduchu ve velkém rozsahu, nízké zatížení disku (tah na plochu disku) zvyšuje energii letadla, účinnost a tím se snižuje spotřeba paliva. [2]

Při zvyšování rychlosti vrtule ztrácejí účinnost, takže se obvykle nepoužívají na vysokorychlostních letadlech nad Mach 0,6-0,7. Avšak jsou motory, které mohou být použité při letových rychlostech blížících se 0,75 Machu.

Turbovtulové motory mohou mít obtokové poměry až 50–100, ačkoli propulzní proud vzduchu je méně definován pro vrtule než pro ventilátory.

Zatímco většina moderních proudových motorů používá kompresory s axiálním průtokem, turbovtulové motory obvykle obsahují alespoň jeden stupeň odstředivé komprese. Odstředivé kompresory mají tu výhodu, že jsou jednoduché a lehké.

Turbovtulové motory jsou populárními u letounu typu Cessna Caravan a Quest Kodiak, L-410.



**Obrázek 4 Srovnání účinnosti pohonu prorůzné konfigurace motorů s plynovou turbínou**

## 2 Monitorování

Monitorování představuje činnost nebo způsob, jakým je sledováno chování objektů či procesů. Zjišťuje se tak žádoucí nebo naopak nežádoucí očekávané chování.

Monitorování stavu motoru je zčásti založeno na získávání letových údajů. Motory jsou vybaveny více snímači, které měří různé parametry, které jsou sledované v reálném čase během letu. Z naměřených dat může být zjištěna porucha a provedená oprava. Na základě vážnosti poruchy, letecká společnost bude muset let odložit nebo zrušit, v závislosti na odhadované době opravy. Naměřené hodnoty jsou ukládány, proto monitorování lze provádět také po letu za účelem zjištění jakékoli změny, které mohou být označeny jako počáteční známky poškození. [13]

Tradiční sledování stavu motorů je založeno na odborných znalostech a zkušenostech mechaniků. Poruchy a včasné známky závad jsou identifikovány z vhodných měření spojených s přizpůsobenou výpočetní transformací dat. Typická výpočetní transformace spočívá v předběžném zpracování dat, aby se odstranila závislost na venkovních podmínkách (teplota, vibrace apod.). Například software je navržen tak, aby zaznamenával data v předem stanovených časových intervalech, ve kterých bude sledovat vývoj takového měření, nebo časový okamžik, během kterého mělo být takové měření zaznamenáno. Na základě zaznamenaných parametrů, software kalibruje model rozpoznávání vzorů, který může automaticky reprodukovat časovou segmentaci provedenou odborníkem. [15]

Diagnostiku provádí mechanik, který shromažďuje všechny dostupné výsledky diagnostických dat. Úloha rozhodování založená na všech přichozích informacích pocházejících z různých subsystémů je obtížná. První potíž nastává při výměně dat mezi subsystémy, což znamená, že v některých situacích může být dočasné znamení selhání, zjištěním nesrovnalostí mezi subsystémy. Kromě toho algoritmy subsystému mohou poskytnout protichůdné výsledky nebo rozhodnutí s velmi nízkou úrovní jistoty. Konečným úkolem operátora je nejen určit budoucí známky selhání, ale také vydat doporučení ohledně potřebné preventivní údržby. Jinými slovy, musí provozovatel identifikovat možnou příčinu potenciálního selhání. [13]

Každý let vytváří desítky letových událostí a velký objem dat. Slučováním těchto dat se vytváří vícerozměrný časový popis chodu motoru. Kromě toho mohou být vzorkovací rychlosti jednotlivých rozměrů v závislosti na snímačích různé, stejně jako počet kritických časových bodů zaznamenaných během letu pro daný snímač.

Na základě odborných znalostí se tato komplexní sada časových řad transformuje na plnorozměrný vektorový indikátor. Pak se může rozlišovat mezi očekávaným chováním a pozorovaným chováním, což vede k jedné nebo několika výsledným odchylkám. Takové výsledky jsou následně transformovány na binární indikátory, kde 1 znamená, že je zjištěna odchylka, a 0 znamená, že nebyla zjištěna žádná odchylka.

## 3 Detekce a izolace poruch

Fault detection, isolation, and recovery – FDIR (překlad do češtiny: „detekce poruch, izolace a obnovení“), je řídicí technika, která se zabývá monitorováním parametrů a zjišťováním, kdy došlo k poruše, a určením typu poruchy a jejího umístění. Lze rozlišit dva přístupy: přímé rozpoznávání vzorků čtecích hodnot senzoru, které indikují poruchu a analýzu nesrovnalosti mezi odečty snímačů a očekávanými hodnotami, odvozenými z nějakého modelu. Pro druhý uvedený případ je typické, že chyba je zjištěna, je-li zjištěna porucha, když odchylka nebo zbytková hodnota přesahuje určitou hranici. Úkolem izolace poruch je následně klasifikovat druh poruchy a jeho umístění v zařízení. Techniky fault detection and isolation (FDI) (překlad do češtiny: „detekce a izolace poruch“) lze obecně rozdělit do dvou kategorií: FDI založené na modelu a FDI založené na zpracování signálu.

### 3.1 Modelová metoda

V modelových metodách FDI se používá určitý model systému pro rozhodování o výskytu závady. Systémový model může být matematický, nebo založený na znalostech. Některé z modelových technik FDI zahrnují přístup založený na pozorovateli, přístup parity-space (překlad do češtiny: „paritní prostor“) a metody založené na identifikaci parametrů. Existuje další trend schémat FDI založených na modelu, který se nazývá metody set-membership (překlad do češtiny: „členství“). Tyto metody zaručují detekci poruchy za určitých podmínek. Hlavní rozdíl spočívá v tom, že namísto nalezení nejpravděpodobnějšího modelu tyto techniky vynechávají modely, které nejsou kompatibilní s daty. [13]

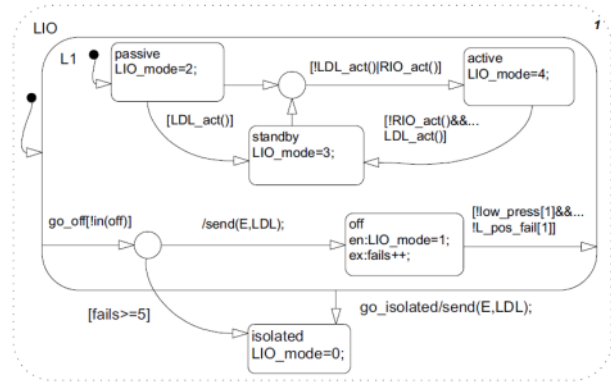
Condition Table:

#	Description	Condition	1	2	3	4	5	6	7
1	Hydraulic system 1 Low pressure (Left Outer line)	low_press[1]	T	T	F	F	-	-	-
2	Left Outer actuator position failed	L_pos_fail[1]	-	-	T	T	-	-	-
3	Hydraulic system 2 Low pressure (Inner line)	low_press[2]	F	-	F	-	T	-	-
4	Left Inner actuator position failed	L_pos_fail[2]	F	-	F	-	T	-	-
	Actions		2	3,5	3	3,5	4	5	Default

Action Table:

#	Description	Action
1	Default - All ok, do nothing.	Default:
2	Hydraulic System 1 Failure. Turn off Left Outer Actuator	send(go_off,Actuators.LO);
3	Left Outer Actuator Failure. Isolate Left Outer Actuator	send(go_isolated,Actuators.LO);
4	Hydraulic System 2 Failure. Turn off Left Inner Actuator	send(go_off,Actuators.LI);
5	Left Inner Actuator Failure. Isolate Left Inner Actuator	send(go_isolated,Actuators.LI);

(a) Truth table logic



(b) Mode logic

**Obrázek 5 Příklad modelové logiky FDI pro pohon v řídicím systému výškového kormidla letadla [13]**

Příklad na obrázku 5. ukazuje modelovou metodu FDI pro reaktivní regulátor (reactivecontroller) výškového kormidla letadla pomocí tabulky pravdivosti a stavového diagramu. Pravdivostní tabulka definuje, jak regulátor reaguje na zjištěné poruchy a stavový diagram definuje, jak regulátor přepíná mezi různými režimy provozu (pasivní, aktivní, pohotovostní, vypnuté a izolované) každého pohonu. Pokud je detekována porucha v hydraulickém systému 1, pravdivostní tabulka odešle událost do stavového diagramu, který má být vypnut levým vnitřním pohonem. Jednou z výhod této techniky FDI založené na modelu je, že tento reaktivní regulátor může být také připojen ke kontinuálnímu modelu hydraulického pohonu, umožňující studium spínacích přechodů.

### 3.2 Signálová metoda

V případě FDI založeného na zpracování signálu se na naměřených hodnotách provádějí matematické nebo statistické operace, a neuronové sítě jsou nastaveny pomocí měření k získání informací o poruše.

Příkladem FDI založeného na zpracování signálu je odrazová měřicí jednotka časové oblasti, kde je signál vyslán na kabel nebo elektrickou linku a odražený signál je matematicky porovnán s původním signálem pro identifikaci poruch. Spread Spectrum Time Domain Reflectometry (překlad do češtiny: „spektrální reflexometrie časové domény“) například zahrnuje zaslání signálu rozprostřeného spektra pro detekci závad drátů. Byla také navržena metoda seskupení, která by identifikovala novou chybu a segmentovala daný signál do normálních a chybných segmentů. [13]



### 3.3 Diagnostika poruch stroje

Diagnostika poruchy stroje je oblast strojírenství, která se zabývá zjišťováním závad na strojích. Obzvláště dobře vyvinutá část se speciálně týká rotačních strojů, což je jeden z nejběžnějších typů. K identifikaci nejpravděpodobnějších poruch vedoucích k selhání je použito mnoho metod pro sběr dat, včetně sledování vibrací, tepelného zobrazení, analýzy olejových částic. Tato data jsou pak zpracovávána metodami, jako jsou spectral analysis (překlad do češtiny: „spektrální analýza“), wavelet analysis (překlad do češtiny: „vlnková analýza“), wavelet transform (překlad do češtiny: „vlnková transformace“), Gabor expansion (překlad do češtiny: „Gaborove rozšíření“), Wigner-Ville distribution (překlad do češtiny: „Wigner-Villova distribuce“), cepstrum (překlad do češtiny: „cepstrum“), bispectrum (překlad do češtiny: „bispectrum“), correlation method (překlad do češtiny: „korelační metoda“), high resolution spectral analysis (překlad do češtiny: „spektrální analýza s vysokým rozlišením“), waveform analysis (překlad do češtiny: „vlnkova analýza“). Výsledky těchto analýz se používají při analýze primárních poruch, aby se zjistila původní příčina poruchy. Pokud je například diagnostikována porucha ložiska, je pravděpodobné, že ložisko nebylo samo o sobě poškozeno, ale spíše jako důsledek chyb při montáži, které následně vedly k poškození ložiska. Diagnostika poškozeného stavu ložiska nestačí pro účely přesné údržby. Hlavní příčinu je potřeba identifikovat a napravit. Pokud se tak nestane, náhradní ložisko se brzy opotřebuje ze stejného důvodu a zařízení bude poškozeno a zůstane nebezpečné. [13]

Nejobvyklejší technikou pro detekci poruch je technika time-frequency analysis (překlad do češtiny: „časově-frekvenční analýzy“). U rotačního stroje není rychlost otáčení stroje (často nazývaná Revolutions Per Minute (RPM) (překlad do češtiny: „otáčky za minutu“)) konstantní, zvláště během spouštění a odstavení stroje. Dokonce i v případě, že stroj běží v rovnovážném stavu, rychlost otáčení se bude měnit kolem střední hodnoty ustáleného stavu, a tato odchylka závisí na zatížení a dalších faktorech. Získané zvukové a vibrační signály jsou časově proměnné. Tyto časově proměnné funkce nesou náznaky poruchy stroje a jsou důležité pro výzkumné a průmyslové aplikace. [13]

Nejběžnější metodou používanou při analýze signálu je Fast Fourier transform (FFT) (překlad do češtiny: „Rychlá Fourierova transformace“), nebo Fourier transform (překlad do češtiny: „Fourierova transformace“). Fourierova transformace nabízí dvě perspektivy pro studium signálu: přes časovou doménu nebo přes kmitočtovou oblast. Spektrum časového signálu založené na FFT nám ukazuje existenci jeho frekvenčního obsahu. FFT je však vhodný pouze pro signály, jejichž frekvenční obsah se v průběhu času nemění, frekvenční

obsah zvukových a vibračních signálů získaných z rotačního stroje je časově závislý. Z tohoto důvodu spektra založená na FFT nejsou schopna rozpoznat, jak se frekvenční obsah vyvíjí v průběhu času. Přesněji řečeno, pokud RPM stroje roste nebo klesá během jeho spuštění nebo vypnutí, jeho šířka pásma v spektru FFT bude mnohem širší, než by to bylo jen pro ustálený stav.

## 4 Palubní diagnostika

Moderní letecké motory jsou složité, proto spolehlivost a účinnost jsou pro provozovatele zvláště důležité. Je nezbytné přesně vědět současný výkon motoru. Rychlá diagnostika a náprava problémů zachovávají bezpečnost a sníží provozní náklady.

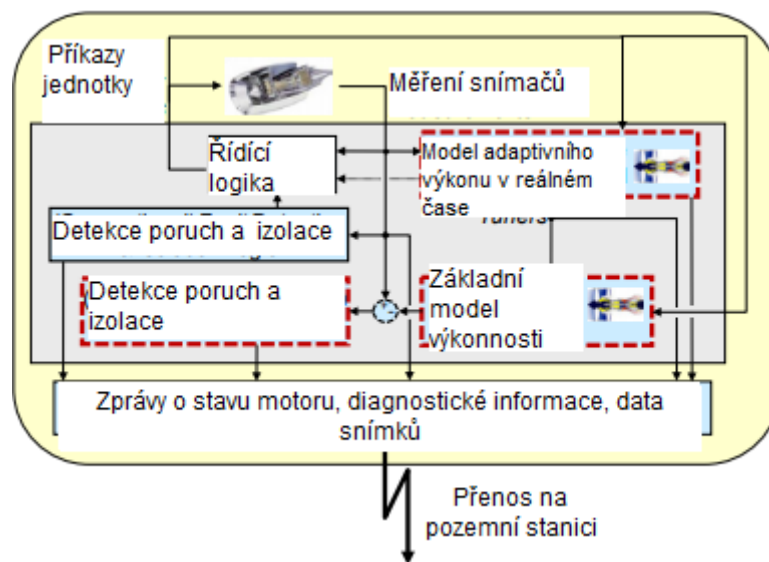
Motor s plynovou turbínou bude vykazovat postupnou degradaci po celou dobu jeho životnosti. Účinnost plynové turbíny pomalu klesá při opotřebení součástí při běžném používání. Přesný stav motoru může mechanikům pomoci určit letové hodiny zbývající do pravidelné údržby. Navíc, stejně jako všechny složité stroje, motor může mít poruchy, včetně poklesu výkonů, zkreslení měřených parametrů a pokles tahu. Tyto poruchy se mohou objevit náhle nebo se mohou postupem času vyvinout. Pro zajištění efektivního a bezpečného provozu je nezbytná diagnostika poruch. [11]

Diagnostika motoru a jeho výkonu se opírá o jednoduchou on-board diagnostiku (OBD) (překlad do češtiny: „palubní diagnostiku“) a pozemní diagnostiku poruch. OBD zahrnuje kontroly změn a testování, aby se zajistila správná činnost řídicích systémů motoru. Pozemní personál spoléhá na snímaná data naměřená během letu a výkonnost motoru, na základě, kterých může identifikovat poruchu. [11]

Vylepšená OBD nabízí výhody oproti klasické diagnostice. Klasická diagnostika je prováděna v přesně stanovených intervalech bez ohledu na zákonitosti vzniku poruch. Prohlídky se periodicky opakují, přičemž postupně roste rozsah prohlídky. Součást je vyměněna po pevně stanoveném čase nebo počtu cyklů bez ohledu na její aktuální stav. Díky pokrokům ve výpočetních sítích dostupných v leteckých systémech je možné použít integrovanou diagnostiku založenou na modelu OBD a lze využít výhody těchto systémů. Na rozdíl od toho klasický přístup založený na pozemní diagnostice využívá mnohem méně dat pro sledování trendů degradace motoru a pro diagnostiku poruch. Dostupnost dat v reálném čase může významně snížit náhlý výskyt poruchy. Při použití ve spojení s konvenčními postupy a existujícími integrovanými testy se očekává výrazné zlepšení detekce poruch a jejich následné odstranění. Modelové řešení navíc nabízí schopnost odhadnout nezměněné parametry motoru, které mohou být potenciálně použité v řídicích systémech jak na úrovni motoru, tak na úrovni letadel. [11]

## 4.1 Adaptivní výkonnostní model v reálném čase

RTAPM je model, který poskytuje údaje o stavu motoru a odhad parametrů na základě aktuálních provozních podmínek, příkazů motoru a sensorů. Tento odhad výkonu motoru je zachycen pomocí Kalmanova filtru navrženého specificky pro tuto architekturu.



**Obrázek 6 Vylepšená diagnostika monitorování a diagnostika plynových cest [11]**

Navrhovaná architektura zdokonaluje konvenční logiku detekce poruch a izolace, s přidáním modelu adaptivního výkonu v reálném čase a modelu základního výkonu, který je načrtnut červeně.

Samotný Kalmanův filtr byl generován z lineárního odhadu nelineárního modelu motoru. Částečný lineární model, včetně všech prostorů a výsledného částečného lineárního Kalmanova filtru, je naplánováno na tři provozní podmínky motoru: tlaková nadmořská výška, Machové číslo a rychlost ventilátoru nebo power lever angle (PLA) (překlad do češtiny: „úhel výkonové páky“), který působí jako referenční parametr výkonu. Bylo zjištěno, že použití trojrozměrného algoritmu plánování poskytuje nejlepší přesnost odhadu oproti nelineárnímu modelu. [11]

#### **4.1.1 Volba modelu ladění parametrů motoru**

RTAPM s Kálmánovým filtrem je konstruován tak, aby odhadoval dynamický stav motoru a dodatečné parametry, které mají zachytit účinky zhoršení výkonu motoru. Parametry modelované jako efektivita a průtokové kapacity se používají jako míra degradace motoru. Parametry však nejsou přímo měřitelné. Obvykle je potřeba definovat parametry motorů. To umožní Kalmanová analýza, ale může to mít za následek „rozmazání“ parametrů a následné zavedení chyb v přesnosti celkových aplikací pro odhad výkonu. [11]

## 5 Monitorování parametrů leteckých motorů

Tradiční údržba byla založena na koncepci, že každá součástka letadla musí být rozebrána ke kontrole. Plánování údržby bylo provedeno na základě předem stanovených letových hodin a po vyčerpání životnosti byla součástka odstraněna a nahrazena novou. To bylo proveditelné na menších letadlech. S příchodem velké hromadné letecké dopravy tento způsob údržby postupně zanikl, náklady na tuto praxi pro leteckou společnost nebyly udržitelné.

Vzhledem k této situaci filozofie údržby letadel se musela vyvíjet tak, aby byla schopná reagovat na náročné bezpečnostní normy a ekonomické omezení leteckého průmyslu. Konzervativnější způsob provádění údržby je stanoven na základě letových hodin, cyklů nebo dokonce kalendářních dnů, a podle manuálu pro údržbu letadla dopravce může součástku v provozu nechat nebo vyměnit za novou. Tento typ údržby se nazývá Hard-Time Maintenance (HT). Provádění periodické inspekce (On-Condition Maintenance) je způsob, jak minimalizovat vysoké náklady spojené s HT. OC je typ údržby letadla, při kterém jsou díly nahrazovány pouze tehdy, když jejich stav již není letově způsobilý, nikoliv ve stanovených intervalech. Prodloužení období mezi povinnou údržbou nabízí nákladově efektivnější způsob plánování údržby. [15]

Většina selhání se nevyskytuje okamžitě, ale spíše během opotřebení, které lze sledovat. Monitorování je založeno na analýze dat v reálném čase, které určují životnost daného zařízení. Tento přístup umožňuje provádět údržbu pouze tehdy, když to zařízení skutečně potřebuje, a tak šetří peníze vynaložené na zbytečnou údržbu. Vývoj v posledních letech umožnil instalaci rozsáhlých přístrojů na palubu letadla, a sensoru do motorů, které v kombinaci se zdokonalenými nástroji pro analýzu dat poskytují informace potřebné k určení správného času pro provedení údržby na daném zařízení. Navzdory své užitečnosti existuje několik problémů, které je třeba vzít v úvahu. Investiční náklady na zavedení struktury potřebné k provedení sběru dat jsou značně vysoké. [2]

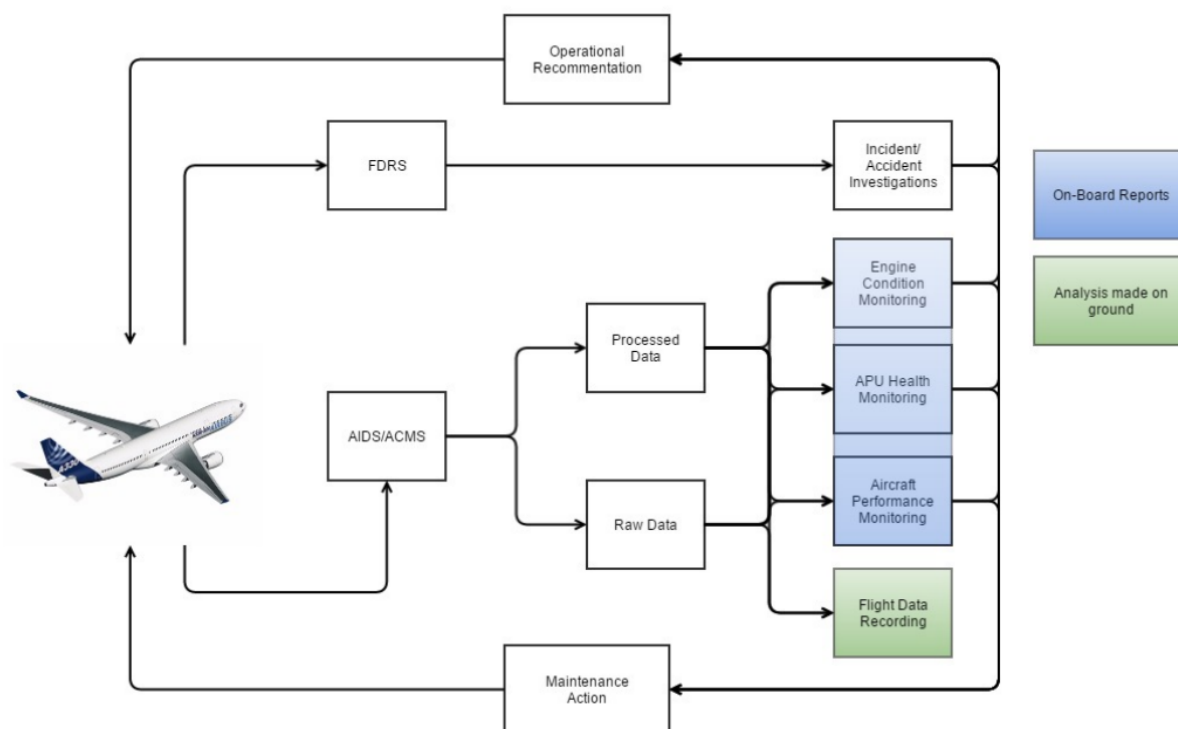
Záznam a zobrazení dat jsou korelovány, systémy pro zaznamenávání letových údajů uchovávají údaje shromážděné od několika sensorů na palubě letadla, které jsou také k dispozici pilotům prostřednictvím Display Unit (DU). Komunikace mezi těmito systémy se provádí protokolem ARINC 429. ARINC 429 je datová sběrnice typu point-to-point používaná v komerčních a dopravních letadlech. [15]

Kvalita a množství záznamů budou do velké míry záviset na spolehlivosti sledování výkonu. Jeden ze způsobů získávání dat z letadla je ruční zaznamenávání údajů za letu, druhý způsob je automatické zaznamenávání dat z Flight Data Recorder (FDR) na palubě letadla (pouze tyto dva způsoby budou rozebrány).[15]

Systémy záznamu a monitorování letadel jsou rozděleny do tří kategorií:

- I) Centralized Fault Display System (CFDS) – palubní monitorovací systém
- II) Flight Data Recording System (FDRS)
- III) Aircraft Integrated Data System (AIDS) a Aircraft Condition Monitoring System (ACMS)

Systémy odpovědné za shromažďování parametrů letadel jsou FDRS a AIDS / ACMS. Zatímco první je určena pro pomoc operátorům v případě nehod nebo incidentů, ACMS nad rámec toho ukládá informace potřebné pro monitorovací akce, které mohou obsahovat parametry, které nejsou povinné. AIDS / ACMS slouží k monitorování systémů letadel, zejména motorů, jednotky Auxiliary Power Unit (APU) a výkonu letadel, aby bylo možno provádět preventivní činnosti, jako je hodnocení výkonu motoru letadla nebo sledování spotřeby paliva.



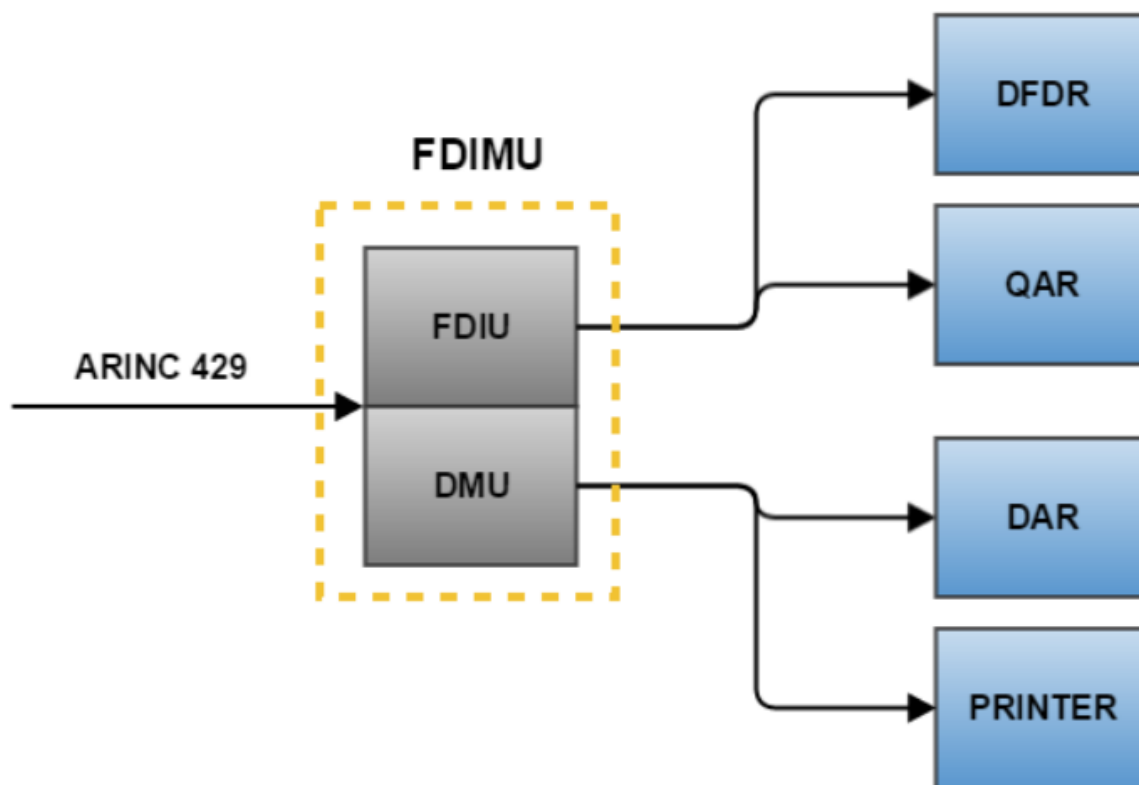
**Obrázek 7 Zpětná vazba AIDS a záznam povinných parametrů FDRS [15]**

Na obrázku č. 8 je zobrazena zpětná vazba AIDS a záznam povinných parametrů FDRS. Modře jsou označeny procesy, které obsahují informací pocházející z automatizovaných reportů generovaných systémy letadel pro automatizované zaznamenávání a zpracování dat, Data Management Unit (DMU) (překlad do češtiny: „jednotka pro správu dat“). Provozovatelé tyto informace použijí ke sledování stavu některých systémů, ale jsou omezeny informacemi, které jim byly poskytnuty. Procesy, které mohou pocházet z FDR, zahrnují:

- I) Flight Operations Monitoring – Monitorování letových operací
- II) Maintenance Monitoring – Monitorování údržby
- III) Performance and Fuel – Výkon a palivo
- IV) Engine Health Monitoring – Monitorování zdraví motoru
- V) Output to Flight Visualization – Výstup do vizualizace letu

Pokud jde o implementaci systému AIDS / ACMS, je tento systém hlavně propojen s DMU. V závislosti na konfiguraci letadla může být spojen s FDIU. Kombinace těchto dvou systémů komponuje rozhraní Flight Data Interface and Management Unit (FDIMU). Jednou z funkcí FDIU je zpracování příchozích dat za účelem stanovení stabilních podmínek a sledování překročení limitů. [15]





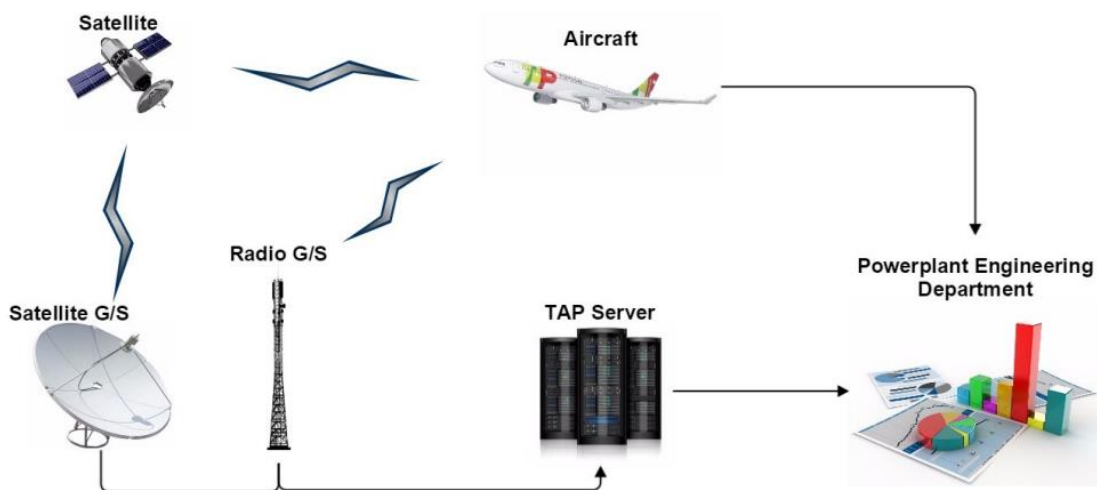
Obrázek 8 Základní architektura systému AIDS / ACMS [15]

## 5.1 Systémy pro sběr dat

Jedním z hlavních zdrojů informací je shromažďování údajů za letu. Starší generace letadel neměla k dispozici zařízení pro automatické načítání dat, údaje musely být ručně zaznamenány piloty nebo letovými inženýry během všech letových fází. Jednou z nevýhod této metody bylo to, že měřené parametry byly omezeny na ty, které byly k dispozici v kokpitu. [15]

S vývojem technologií jsou moderní komerční letadla vybaveny systémy schopnými automaticky zaznamenávat data pro účely sledování, a také schopnost ukládat větší počet parametrů. Dále je možné získat novou sadu parametrů pomocí složitějších senzorů, které mohou například měřit mezistupňové teploty a tlaky z plynových turbín. Použití vylepšených systémů jako je systém AIDS / ACMS, umožňuje provádět další operace, jako je například zaznamenávání stabilních letových parametrů pomocí automatizovaných vyhledávacích kritérií nebo zachycování vzletových dat ve správném čase pomocí konkrétních kritérií. [15]

Přenos údajů zaznamenaných na palubě letadla do oddělení odpovědného za jejich zpracování provádí pomocí Aircraft Communications Addressing and Reporting System (ACARS). ACARS je infrastruktura pro datovou komunikaci vzduch-země používaná stovkami leteckých společností po celém světě pro komunikaci s řízením letového provozu a výměně dat s leteckou společností. Letecké společnosti používají pozemní stanice ACARS VHF a HF, stejně jako družicovou komunikaci. Zprávy obsahující informace o letadle jsou přeměrovány na server letecké společnosti, odkud mohou být data shromažďována pro další zpracování a analýzu. Tyto zprávy mohou zahrnovat informace o navigaci, hlášení o poloze letadel, odletech, oceánských vzdálenostech, podmínkách dráhy, údajích o počasí a dokonce přenáší zprávy o stavu motoru.[15]



**Obrázek 9 Schéma systému pro sběr dat [15]**

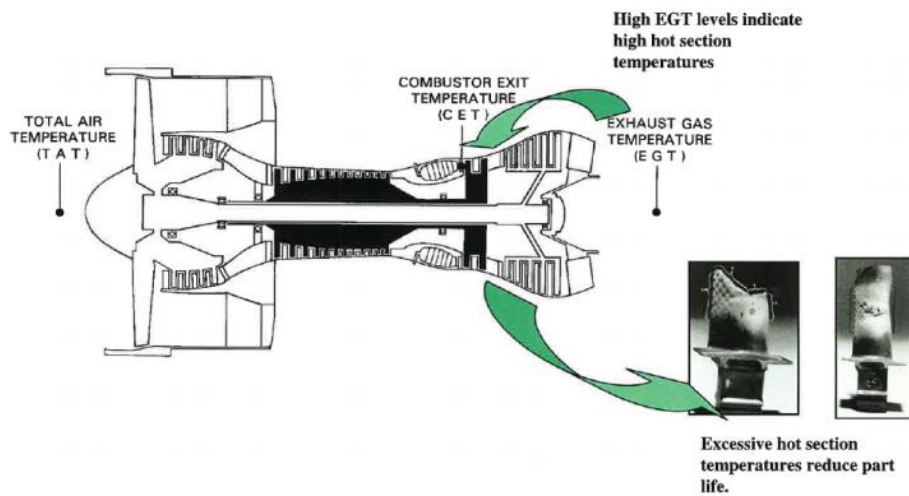
Během normálního provozu budou všechny motory vystaveny tření, tepelnému namáhání, mechanickému namáhání, hromadění nečistot, příjmu cizích částic, které nakonec povedou ke snížení účinnosti. Neustálým sledováním vývoje klíčových parametrů, které mohou překládat stav motoru, může být zjištěno zhoršení výkonu motoru, stejně jako včasné známky poruch motoru, a proto mohou být provedena vhodná opatření. Monitorování parametrů je procesem, kterým se zpracovávají měření parametrů za letu a pak se porovnávají s výchozím modelem, který představuje očekávané chování daného motoru s přihlédnutím k okolním podmínkám a podmínkám tahu, jako kdyby byl nově instalován nebo na jeho nejlepší výkon. Časový rozdíl mezi naměřenými daty a základním typem se nazývá Parameter Delta. Monitorování vývoje těchto delt je to, co poskytuje znalosti o aktuálním stavu motoru a umožňuje odhadnout, jak se jeho výkon zhoršuje s každým letem. [15]

## 5.2 Monitorované parametry

Jeden z parametrů výkonu motoru, který se používá při monitorování trendů, je Exhaust Gas Temperature (EGT). Když výkon motoru klesá, je třeba spálit více paliva, aby bylo dosaženo daného tahu. Zvýšení spotřeby paliva je spojeno se zvýšením EGT. Spotřeba paliva v průběhu letu může být měřena prostřednictvím Fuel Flow (FF) (překlad do češtiny: „průtok paliva“). Mezi další parametry důležité pro ECM patří Engine pressure ratio (EPR) (překlad do češtiny: „poměr tlaků motoru“), který představuje poměr celkového tlaku turbíny k celkovému tlaku na přední straně lopatek / kompresoru, Low-pressure Fan Speed (N1) (překlad do češtiny: „nizkotlaká rychlost dmychadla“), která odpovídá Rotations Per Minute (RPM) (překlad do češtiny: „otáčky za minutu“) nízkorychlostního rotoru motoru a je obvykle vyjádřeno jako procento referenční rychlosti otáčení lopatek, High-pressure Fan Speed (překlad do češtiny: „rychlost vysokotlakého kompresoru“) podobná rychlosti N1, tlakový kompresor a vysokotlakou turbínu a rozpětí EGT, které se překládá do rozdílu mezi certifikovaným maximem EGT při vzletu a projekcí skutečného EGT motoru na vzlet za referenčních podmínek. [15]

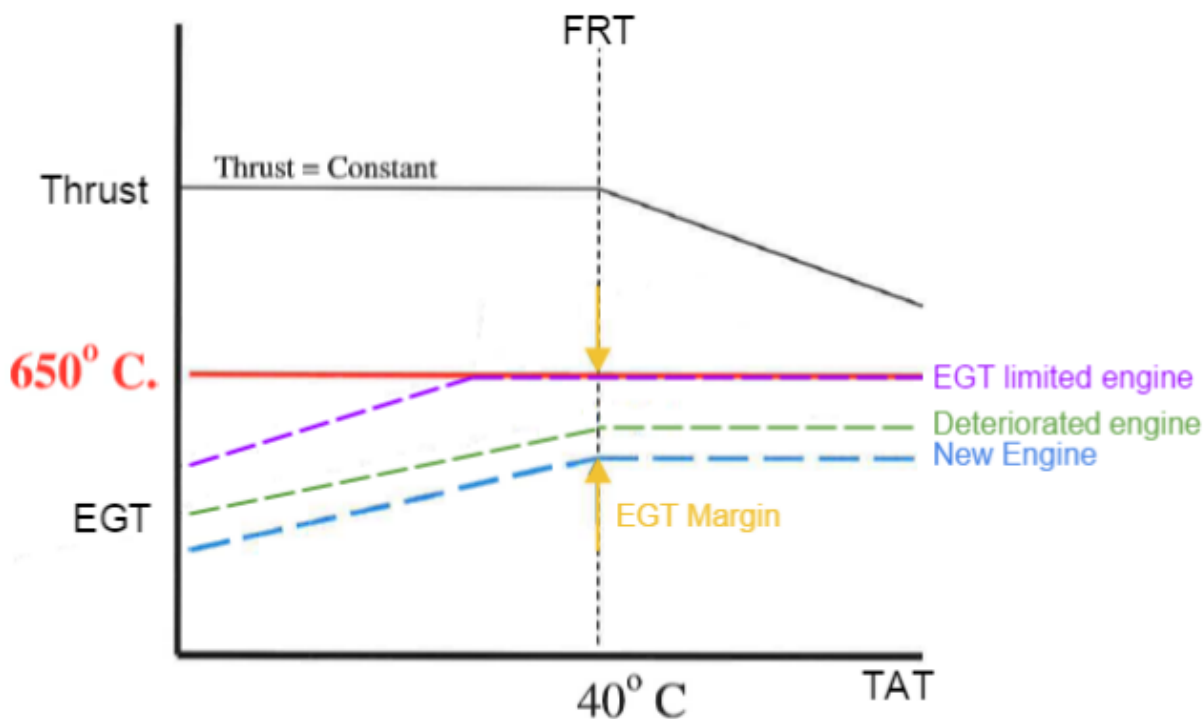
## 5.3 EGT - Teplota výfukových plynů

EGT je parametr trvanlivosti a provozuschopnosti. Představuje rozdíl mezi skutečnými úrovněmi EGT pro daný stav letu (N1, Machovo Číslo (MN), Nadmořskou výškou (ALT) a Celkovou teplotou vzduchu (TAT)) a červenou zónou, která je stanovená výrobcem OEM motoru. Vzhledem k tomu, že parametry použité v modulu ECM jsou obvykle upraveny pro standardní podmínky na hladině moře, je umožněno srovnání mezi měřeními a skutečnými parametry za různých atmosférických podmínek. To znamená, že při vyhodnocování vlivu určitých hodnot na integritu motoru, jako jsou teploty, které horká část motoru zažívá, musí být vzaty v úvahu parametry, které jsou používány pro sledování stavu. Teplota nad mezní hodnoty může výrazně snížit životnost dílů. Přehřátí může způsobit korozi. Odolnost turbínových lopatek a rotujících součástí může být snížena přibližně dvojnásobně při zvýšení teploty o 50 stupňů Celsia. Mohou vzniknout další požadavky na kontrolu nebo předčasné odstranění motoru. [15]



**Obrázek 10 Motor Pratt & Whitney. Následky nadměrných hodnot EGT [15]**

Když se účinnost motoru zhorší, EGT se zvýší a výkon letadla se sníží. Časem může být EGT natolik vysoké, že již nebude možné dosáhnout tahu pro vzlet při Flat Rate Temperature (FRT). FRT je teplota, do které výrobce motoru zaručuje, že motor vytvoří jmenovitý tah.

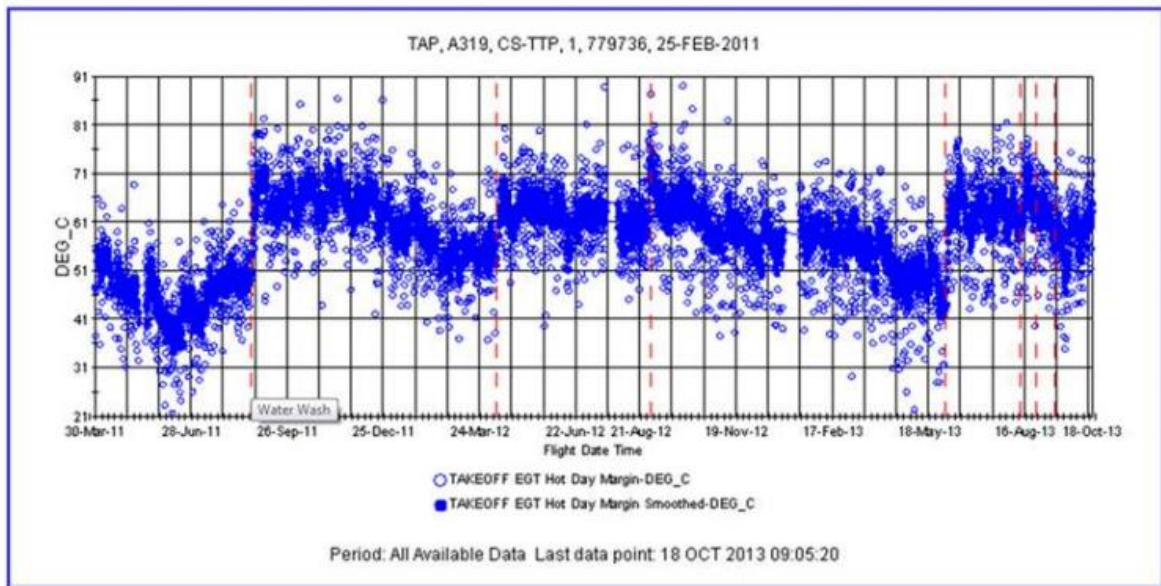


Obrázek 11 EGT v různých podmínkách motoru [15]

EGT je jedním z hlavních ukazatelů zhoršení stavu motoru a letecké společnosti mají limit pro počet překročení. Slouží také jako ukazatel degradace výkonu motoru a umožňuje letecké společnosti sledovat ztráty výkonu motoru. Po překročení počtu nebo po značně nízkém rozpětí EGT musí dojít k údržbovému zásahu. Postupem času motor stárne, díky normálnímu opotřebení motoru začne EGT postupně klesat. Z důvodu ztráty účinnosti, motor spálí více paliva, což povede k vyššímu EGT. Míra degradace těchto parametrů je velmi závislá na rychlosti, počtu letových hodin, prostředí a péči s níž je provozována. [15]

### 5.3.1 Obnova EGT

Operátoři se někdy pokusí obnovit ztracené EGT tím, že provedou zásahy do motoru. Patří mezi ně i mytí motorů, které obnoví část ztráty výkonu. Graf byl vytvořen s analytickým softwarem společnosti GE a zobrazuje vývoj EGT [°C] od 30/03/2011 do 18/10/2013.

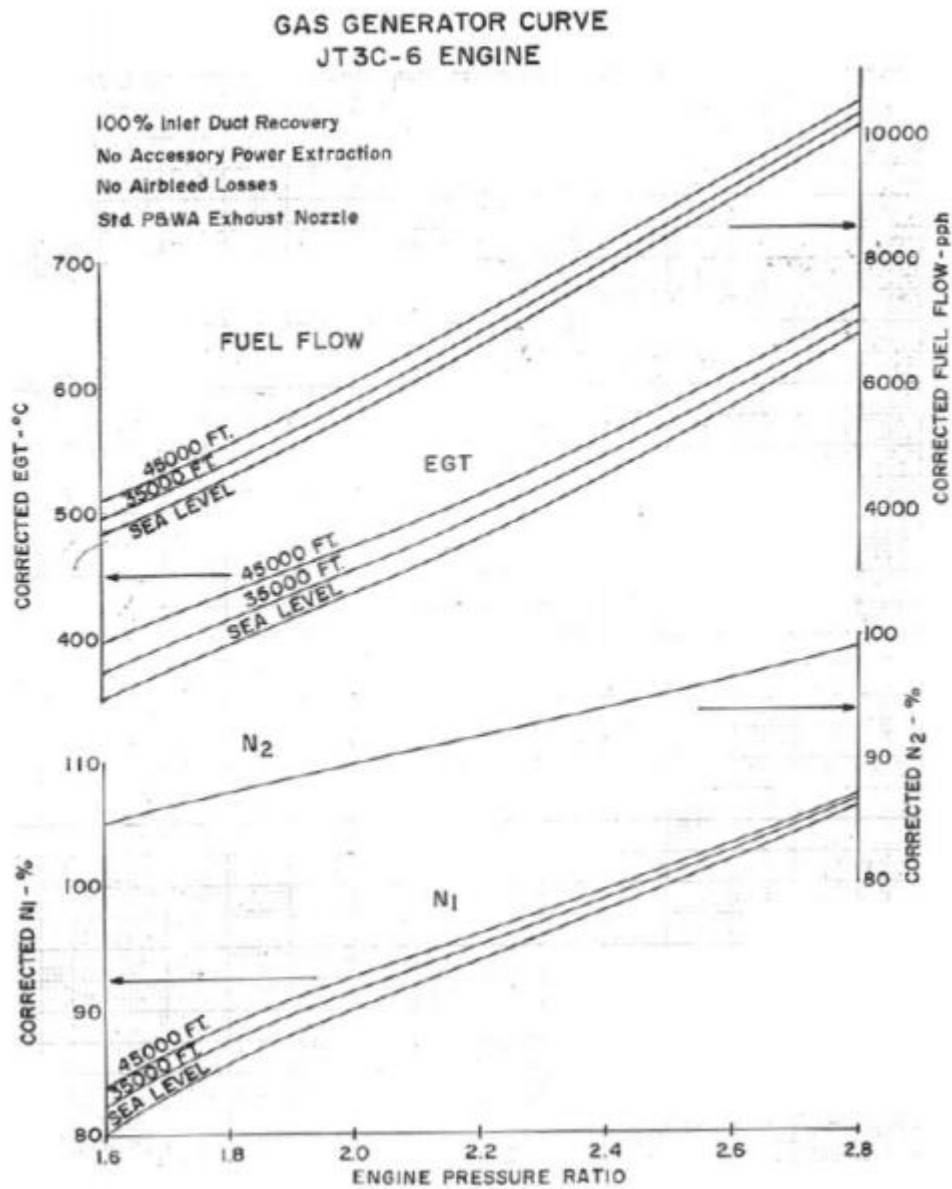


**Obrázek 12 Mytí motoru a jeho účinky na EGT [15]**

Červené čáry představují data, kdy došlo k umytí motoru. EGT se okamžitě zvýší po umytí a jak začne klesat v průběhu času, dokud nebude motor umyt znovu.

### 5.3.2 Základní model a sledování

Monitorování parametrů je proces, kterým jsou zaznamenávány údaje o motoru a porovnány s výchozím modelem motoru. Rozdíl mezi naměřeným výkonem a očekávaným výkonem založeným na základním stavu motoru je Delta parametr. Delta parametr může být použit k posouzení stavu motoru. Dnešní nástroje ECM automaticky zaznamenávají data z motorů a provádějí analýzu a zpřístupňují tyto informace operátorům. [15]



**Obrázek 13 Charakteristiky výkonu pro motor JT3C-6 [15]**

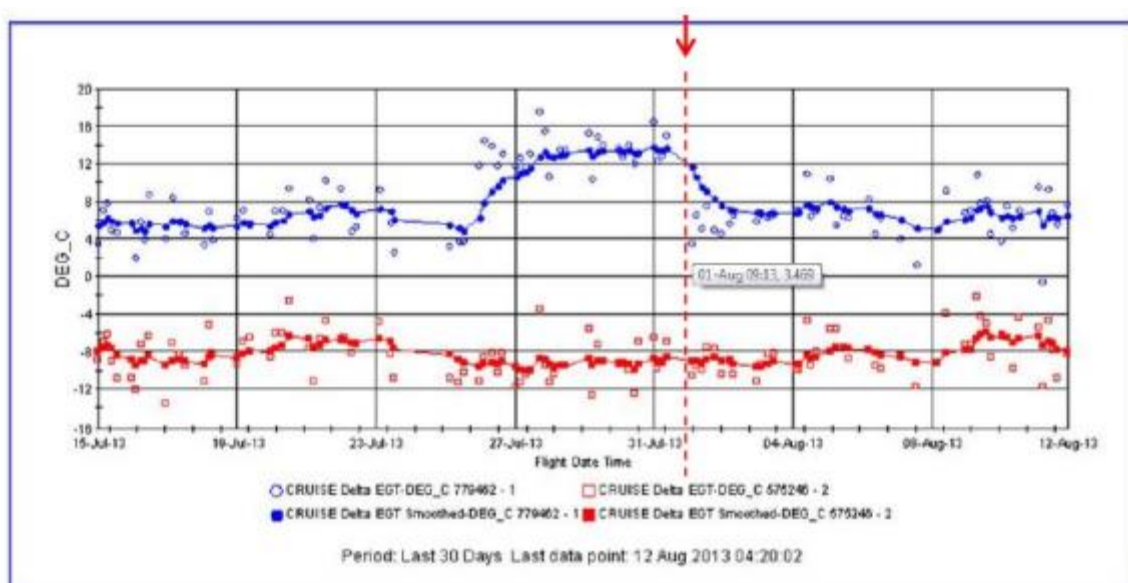
Výchozí hodnoty umožňují odhad očekávaného chování motoru při různých podmínkách tahu. Výrobci motorů odvozují své základní modely zkoušením každého motoru před tím, než opustí továrnu v novém stavu, za předpokladu, že motor má nejlepší výkon, když je nový.

### 5.3.3 Zjišťování zhoršení výkonu

Nejjednodušší způsob, jak identifikovat zhoršení výkonu motoru, které je třeba prošetřit personálem údržby, spočívá v analýze výkonových parametrů motoru v průběhu provozu.

#### Grafická interpretace

Abnormální situace související s podmínkami motoru, jako jsou mechanické změny motoru, které mohou způsobit selhání nebo vést k výskytu nehod, obvykle znamenají prudký posun odpovídajících parametrů. Oproti tomu, účinky nahromaděných letových cyklů, které mají za následek opotřebení součástí motoru a zhoršení jeho výkonu, lze identifikovat postupným zvyšováním Delta parametru. V první situaci, dochází ke změně dat, ke které dochází v krátkém časovém úseku. Tyto změny jsou spojeny s pomalou změnou parametru, ke které dochází v delším časovém období. Efektivní sledování pomáhá minimalizovat rizika spojená s neočekávaným selháním motoru a zabraňuje zhoršování výkonu motoru. [15]



**Obrázek 14 Příklad poklesu způsobeného poruchou nízkotlakého turbínového ventilu LPTCC, Delta EGT motoru A320 [15]**

Všimněte si prudké změny v hodnotách Delta EGT pro motor v pozici 1 označené modře a další posun při výměně ventilu označeném vertikálně přerušovanou červenou čarou. Tento druh chování je to, co hledá technická údržba motoru při provádění analýzy parametrů motoru, takže je možné přijmout vhodná opatření a obnovit normální provoz. Bohužel časová perioda není dostatečně široká, aby bylo zřejmé zhoršení výkonu v parametru Delta. [15]



## 6 Porovnání možností sběru dat u malých a velkých dopravních letadel

Pro praktickou část práce jsem vybral jednoho zástupce malých dopravních letadel L – 410 (CS – 23) a jednoho zástupce velkých dopravních letadel Airbus A320 (CS – 25).

### 6.1 L – 410 Turbolet

Budovy letecké továrny v Kunovicích byly určeny pro opravy letadel Avia. V roce 1954 v Kunovicích začala sériová výroba letadel, nejprve cvičného Jak-11, později dvoumotorového aerotaxi Aero Ae-45. V té době se již začalo přemýšlet nad uskutečněním vlastního projektu. První profesionální debut výzkumně-vývojové základny letecké továrny v Kunovicích byl větroň VSM-40 Dément, a následně výroba pětímístného aerotaxi L-200 Morava. Na přelomu padesátých a šedesátých let, požadoval Aeroflot místo L-200 letadlo s kapacitou 10 až 12 osob, tedy náhradu za An-2.

Úvodní studie typu L-410 pochází z let 1966 až 1967. Letoun byl navržen pro dopravu 12 až 19 cestujících nebo nákladu do hmotnosti 1850 kg na krátkých tratích mezi letišti všech kategorií, včetně těch s krátkými vzletovými a přistávacími dráhami, s travnatým, hlinitým nebo písčítým povrchem. Letoun byl řešen i s výhledem na další možnosti jeho použití. Kromě salonní či služební verze, s interiérem odpovídajícím přání zákazníka, mohl být letoun konvertován na verzi nákladní, sanitní, výsadkovou, nebo případně fotogrammetrickou. Předpokládalo se i využití pro navigační výcvik posádek.

Širší veřejnosti byl L-410 představen na podzim roku 1970. Rok po premiéře byly L-410 poprvé nasazeny na nepravidelné lince Praha-Brno-Praha podnikem Slov-Air Bratislava.

Další L-410 A byl v dubnu 1972 předveden v Moskvě zástupcům Aeroflotu, o necelý rok později byl uveden do provozu první letoun řady L-410 pro sovětského zákazníka.

První letouny L-410 A byly vybaveny kanadskými motory PT6A-27, protože se vývoj motorů Walter M601 opozdil. Letadel L-410 s motory PT6A-27 bylo postaveno celkem 31 kusů. Když byl dokončen vývoj československých motorů Walter M601, byly motory PT-6 nahrazeny M 601 A (později M 601 B) a letoun dostal třílisté vrtule Avia V508. Stroj dostal označení L-

410M, prototyp byl připraven v roce 1973 a roku 1974 uskutečnil první let, roku 1975 začaly dodávky do SSSR.

Letadla L-410 A byla v průběhu výroby, ale i později v provozu, vybavována nejrůznějšími radionavigačním zařízením. Například jen radiokompasů se postupně používalo několik druhů. Používaly se různé kursové a gyroindukční systémy, navigační přijímače VOR/ILS různých firem. Dále byly použity různé typy odpovídačů sekundárního radiolokátoru, komunikační VKV radiostanice.

Další variantou byl L-410 UVP (ruská zkratka pro krátký vzlet a přistání, anglicky STOL). Promítly se do něj všechny požadavky zákazníka, u kterého existoval předpoklad dlouhodobých dodávek ve značných počtech. Má prodloužený trup, zvětšené rozpětí křídla a vzepětí stabilizátoru bylo upraveno na +7°. Do systému automatického praporování byla přidána ploška ABC (Automatic bank control). Jedná se o plošku na konci křídla, která se automaticky otevře při výpadku jednoho motoru, ovšem pouze do rychlosti 205km/hod. Křídlo bylo vybaveno interceptory. Bylo zlepšeno vybavení i brzdy. Nejprve do něj byly montovány motory M601B se stejným výkonem, ale při vyšších teplotách účinnějšími, později se však začaly montovat motory M601D a vrtule V508D. Počet míst je 15. Vzletová dráha je přibližně 456 metrů. Nejběžnější variantou je L-410UVP-E se zvýšenou maximální vzletovou hmotností, silnějšími motory Walter M601E, pětistými vrtulemi V510. Na konec křidel se dají namontovat vnější (někdy mylně nazývané přídatné) nádrže. Prototyp vzlétl roku 1984 a roku 1985 se započalo s výrobou. Existují další podverze UVP-E: UVP-E9 a UVP-E20, které se liší detaily z důvodu dobových požadavků na vyhovění předpisům JAR 25 resp. FAR-23. Poslední verzí Turboletu je L-420 s motory M601F, který byl certifikován americkým FAA. L-410 verzí M až E (vč. E9 a E20) má typový certifikát vydaný EASA.

Od roku 2014 se testuje speciální verze Let-L410UVP-E20 s lyžemi na podvozku („ski verze“). V dubnu 2017 proběhlo úspěšné testování této verze na ruské základně.



**Obrázek 15 Let L-410 FG českého letectva [18]**

Dne 29. července 2015 poprvé vzlétl letoun LetL-410 NG (nová generace), modernizovaný L-410 UVP E20. Letoun L 410 NG je nový turbovrtulový commuter který si ponechal to nejlepší z letounů řady L 410 a navíc nabízí zlepšené letové parametry a provozní charakteristiky, modernější technologie a inovovanou avioniku. Nová konstrukce křídla s integrální palivovou nádrží disponuje větším objemem, a proto umožňuje letounu L 410 NG podstatně delší dolet a vytrvalost. Tento celokovový hornoplošník je poháněn dvěma výkonnějšími motory GE H85 a vrtulemi AV-725. Ve standardní verzi slouží pro přepravu 19 cestujících a/nebo nákladu z těžko přístupných oblastí s málo rozvinutou infrastrukturou do větších měst či aglomerací. Letoun L 410 NG přepraví díky zvýšenému užitečnému zatížení (payload) a zvětšenému zavazadlovému prostoru o 400 kg více nákladu.

Výhody letounu:

- I) Schopnost vzletu a přistání na krátkých, nezpevněných drahách (STOL)
- II) Výkonové charakteristiky motoru umožňují provoz ve vysokých teplotách a ve vysokých nadmořských výškách

- III) Moderní glass cockpit
- IV) Odolná konstrukce letounu umožňuje provoz v náročných podmínkách
- V) Schopnost provozu v extrémních klimatických podmínkách (v rozmezí teplot  $\pm 50^{\circ}\text{C}$ )
- VI) Variabilita vybavení s možností instalace speciálních výměnných sad
- VII) Nejprostornější kabina pro cestující ve své kategorii
- VIII) Nenáročná údržba a nízké náklady na provoz
- IX) Vynikající bezpečnost a spolehlivost provozu

Hlavním odběratelem těchto strojů je Ruská Federace, jsou prodávány také do zemí Asie, Afriky, Evropy a Jižní Ameriky.



**Obrázek 16 Kokpit L-410 NG [17]**

L – 410 NG je vybaven moderním motorem GE H85 – 200 s novou vrtulí, který přináší řadu výhod.

	L-410 NG GE H85 – 200	L-410 Walter M601
Maximální rychlost	417 km/h	335 km/h
Dolet	2 570 km	1 040 km
Maximální vzletová hmotnost	7 000 kg	6600 kg
Výkon	634 kW	580 kW

**Tabulka 1. Porovnávání charakteristik letadel L-410 a L-410 NG [11]**

## 6.2 Airbus A320

Airbus A320 je řada civilních dvoumotorových proudových dopravních letounů s úzkým trupem pro krátké a střední tratě vyráběných firmou Airbus. Zahrnuje modely A318, A319, A320 a A321, které mají velmi mnoho společných komponent a například velmi podobný kokpit.

Po úspěchu Airbusu A300 začal Airbus vyvíjet náhradu za tehdy nejpobulárnější dopravní letoun na světě – Boeing 727. Nový Airbus měl mít stejnou kapacitu, ale nižší provozní náklady a měl být k dispozici v několika verzích pro různý počet cestujících. Digitální technologie použité u A320 byly symbolem dvougeneračního technologického skoku oproti plně analogovému Boeingu 727 a generačního vůči Boeingu 737 řad -300/400/500. A320 měl být celosvětovou náhradou za 727 a nejstarší varianty 737.

26. února 1988 byl typu udělen certifikát od JAA a A320 mohl vstoupit do služby. Stalo se tak v březnu 1988 u Air France. Od té doby se rodina verzí A320 rychle rozrůstala: výroba 185 místného A321 byla zahájena v roce 1989, 124 místného A319 v roce 1993 a 107 místného A318 v roce 1999.

Ve srovnání s jinými letouny ve stejné třídě má A320 širší kabinu, větší zavazadlový prostor v nad hlavní části a plně digitální fly-by-wire řídicí systém. Navíc má letoun značný nákladový prostor s rozměrnými dveřmi, které usnadňují nakládku a vykládku. Nízké náklady na provoz a údržbu jsou magnetem pro nízkonákladové dopravce.

A320 má dvě varianty A320-100 a A320-200. A320-200 je konečnou verzí, strojů A320-100 se vyrobilo jen několik kusů. A320-200 má na koncích křídel malé winglety a zvýšenou kapacitu palivových nádrží oproti A320-100 (pro větší dolet), další rozdíly jsou minimální.

Typický dolet se 150 pasažéry je u A320-200 asi 5400 km. Pohon obstarávají dva dvouproudové motory CFMI CFM56-5 nebo IAE V2500 s tahem 113 kN až 120 kN.

A319 je zkrácená verze A320 s minimálními změnami. Se skoro shodnou kapacitou palivových nádrží a méně pasažéry se dolet prodloužil na 7200 km, největší ve své třídě. A320 a A319 jsou nejpobulárnější varianty v rodině A320.

A321 je prodloužená verze A320 s minimálními změnami. Plocha křídla byla mírně zvětšena, má oproti A320 dvouštěrbínové klapky a podvozek je zesílen. Pohon zajišťují silnější verze motorů CFM56 a V2500. Někteří dopravci upřednostňují A321 před Boeingem 757, kvůli jeho podobnosti s A318, A319 a A320.

A318, také známý jako „Mini-Airbus“, je nejmenší člen rodiny A320. Letoun je o šest metrů kratší a o 14 tun lehčí než A319. V konfiguraci se dvěma třídami má A318 109 sedadel.

Airbus navázal na úspěch předchozích řad novou řadou A320neo. Ta se od té starší liší především novými motory, lepšími aerodynamickými vlastnostmi, širší kabinou, lepšími zvukovými izolačními vlastnostmi, větším počtem míst a celkovými sníženými náklady na provoz. Neo v názvu znamená „new engine option“, v překladu nová možnost motoru, u řady A320neo je totiž možno si vybrat z motorů CFMI LEAP-1A nebo Pratt & Whitney PW1000G. První let verze A320neo se konal 25. září 2014, verze A319neo poprvé vzlétla 9. února 2016 a verze A321neo 31. března 2017. Verze A318neo není v plánu.

Moderní technologie použité v A320:

- I) první plně digitální fly-by-wire řídicí systém v civilním dopravním letadle
- II) první civilní dopravní letadlo, které používá boční „sidesticky“ místo tradičních řídicích pák
- III) plně skleněný kokpit, tedy ne hybridní verze jako u A310, Boeingu 757 a Boeingu 767
- IV) první dopravní letoun s významným podílem kompozitních materiálů v konstrukci
- VI) centrální diagnostický systém umožňující zjištění problému z pilotní kabiny



**Obrázek 17 Kokpit Airbus A320**

Certifikát JAA typ A320s motory CFM56-5 získal v roce 1988 a ve stejný rok byl letoun uveden do provozu.

### **6.3 Porovnání vybavení letounu A320 s letounem L410**

<b>AVIONIKAA PŘÍSTROJE</b>	<b>A320</b>	<b>L-410</b>
<b>Electronic Flight Instrument System – EFIS</b>	<b>ANO</b>	<b>NE</b>
<b>Electronic Centralised Aircraft Monitor – ECAM</b>	<b>ANO</b>	<b>NE</b>
<b>Flight Data Recorder – FDR</b>	<b>ANO</b>	<b>ANO</b>
<b>Quick Access Recorder – QUR</b>	<b>ANO</b>	<b>ANO</b>
<b>Počet snímaných parametrů</b>	<b>100 &gt;</b>	<b>&lt; 100</b>
<b>Aircraft Communications Addressing and Reporting System – ACARS</b>	<b>ANO</b>	<b>NE</b>
<b>Cockpit Voice Recorder – CVR</b>	<b>ANO</b>	<b>ANO</b>
<b>Flight Management System – FMS</b>	<b>ANO</b>	<b>NE</b>
<b>Autopilot</b>	<b>ANO</b>	<b>NE</b>
<b>Počet motoru</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
<b>Typ pohonu</b>	<b>Dvouproudový</b>	<b>Turbovrtulový</b>
<b>Traffic Collision Avoidance System – TCAS</b>	<b>ANO</b>	<b>NE</b>
<b>Terrain Awareness and Warning System – TAWS</b>	<b>ANO</b>	<b>ANO</b>

**Tabulka 2. Porovnání systémů a parametrů A320 a L – 410 [16][11]**

Airbus A320 má glass cockpit který se vyznačuje tím, že jsou mechanické analogové ukazatele a letecké přístroje nahrazeny digitálními, především LCD displeji. Jak je vidět



z tabulky porovnání A320 má systém EFIS, což je informační systém který na display v pilotní kabině zobrazuje letové informace. EFIS je modernější, efektivnější a srozumitelnější než tradiční přístroje „budíky“. Dále také je vybaven ECAM, který monitoruje funkce letadel a přenáší je pilotovi. Vytváří také zprávy s podrobnostmi o poruchách a v některých případech uvádí seznam postupů, jak mají řešení. Taktéž je vybaven systémem řízení letu (FMS). FMS je základním prvkem letecké techniky moderního letadla. Je to specializovaný počítačový systém, který automatizuje širokou škálu úkolů během letu, což snižuje pracovní zátěž letové posádky tak, aby moderní civilní letadla již neměly letové inženýry nebo navigátory. Primární funkcí je řízení letového plánu během letu. Použitím různých senzorů (například GPS a INS, které jsou často podporovány radionavigací) pro určení polohy letadla, může FMS letoun poletovat podle letového plánu. Z kokpitu je FMS normálně řízen prostřednictvím řídicí jednotky (CDU), která obsahuje malou obrazovku a klávesnici nebo dotykovou obrazovku. FMS odesílá letový plán pro zobrazení do systému elektronického letu (EFIS), navigačního displeje (ND) nebo multifunkčního displeje (MFD). Systém FMS lze shrnout jako dvojí systém sestávající z počítače pro řízení letového provozu (FMC), CDU a sběrnice.

Taktéž v pilotní kabině máme několik druhů zapisovačů. Zapisovače FDR a CVR jsou v dnešní době standardem, kterým musí být vybaveno každé letadlo. Každý z nich má svou funkci: Flight Data Recorder (FDR) nahrává letové údaje (výšku, rychlost, tlak vzduchu v letadle, stav paliva a mnoho dalšího) a Cockpit Voice Recorder (CVR) nahrává rozhovory v pilotní kabině. Jsou to dvě černé skříňky, které se umísťují do letadel, zpravidla do zadní části letadla, protože právě ta bývá při leteckých nehodách poškozena nejméně.

Dále máme záznamník rychlého přístupu (QAR). Je to palubní letový zapisovač určený k rychlému a snadnému přístupu k nezpracovaným letovým datům prostřednictvím USB nebo použití standardního Flash karty. QAR jsou zpravidla využívány leteckými společnostmi ke zlepšení bezpečnosti letů a provozní účinnosti, obvykle pro zajištění kvality. Stejně jako letový záznamník letových údajů (FDR) získá QAR své vstupy od jednotky pro získání letových dat (FDAU), která zaznamenává více než 2000 letových parametrů. QAR je také schopen vzorkovat data za mnohem vyšší sazby než za FDR a v některých případech i za delší časové období. Na rozdíl od FDR, QAR obvykle nevyžaduje národní letecký úřad pro komerční lety a není určen k přežití nehody. Navzdory tomu některé QAR přežily nehody a poskytly cenné informace nad rámec toho, co zaznamenal FDR.

Údaje, které se sbírají během letu jsou v online režimu přenášeny na pozemní stanice prostřednictvím ACARS. Aircraft Communications Addressing and Reporting System (ACARS) je digitální datový okruh pro přenos krátkých zpráv mezi letadly a pozemními stanicemi pomocí rádiových vln (Airband) nebo satelitu.

Dále letadlo Airbus a320 je vybaveno autopilotem, který během letu ovládat létající stroj bez asistence lidské posádky, systémem TCAS – palubní protisrážkový systém který monitoruje okolí a dává pilotům informace a varování týkající se okolního provozu, a TAWS – systém varování před blízkostí terénu.

Starší generace letounu L-410 je vybavena klasickým kokpitem s analogovými přístroji. Modernizovaná verze L-410 NG je už vybavena tzv. glasscockpitem. Zobrazení motorových veličin je tohoto typu letounu ať už starší nebo novější verze vždy analogově. Z tabulky porovnání letadel je vidět, že letoun L-410 je vybaven zapisovačem letových parametrů FDR. FDR je v dnešní době v letecké dopravě standardem definovaným leteckým předpisem L6-Provoz letadel (ICAO Annex 6 – Operation of Aircraft). Pomocí zapisovačů leteckých parametrů lze sbírat data během letu a ukládat je na pevný disk umístěný v těchto zařízeních. FDR neumožňuje data posílat online na pozemní stanice. Letoun L-410 není vybaven systémem ACARS tudíž jakýkoliv online přenos dat během letu zde neprobíhá.

## **6.4 SWOT analýza**

V analyticko-praktické části byla provedena SWOT analýza pro zvážení možnosti monitorování dat u malých dopravních letadel.

<b>SWOT Analýza</b>	<b>Kladné stránky</b>	<b>Záporné stránky</b>
<b>Interní analýza</b>	<b>Silné stránky–Strengths</b>	<b>Slabé stránky–Weaknesses</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definován skutečný stav motoru</li> <li>• Efektivnější plánování údržby</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nedostatek sbíraných dat</li> <li>• Velké finanční náklady</li> </ul>
<b>Externí analýza</b>	<b>Příležitosti – Opportunities</b>	<b>Hrozby – Threats</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prodloužení TBO</li> <li>• Zvýšení bezpečnosti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zpracování a analýza získaných dat</li> </ul>

**Tabulka 3. SWOT analýza**

## **Výhody**

### **Aktuální stav motoru**

Zavedení systému pro monitorování parametru motoru přináší možnost sledování aktuálního stavu pohonné jednotky. Zavedením systému se snažíme o optimalizaci provoz pohonné jednotky. Optimalizace, je proces, při kterém je snaha dosáhnout maximálních hodnot motoru. Pomocí sbíraných dat a následnému vyhodnocení je možné definovat aktuální stav motoru a sledovat, jak se tento stav v čase mění. Znalost stavu motoru a jeho opotřebení přispěje k vyšší bezpečnosti provozu a také k lépe plánované údržbě motoru.

### **Efektivnější plánování údržby**

Efektivnější plánování údržby šetří čas i náklady. Sledování parametrů motoru a znalost jeho aktuálního stavu pomůže sestavit plán údržby tak, aby byl proaktivní. Současný model reaktivní, popřípadě preventivní údržby s pevně stanovenými intervaly je zastaralý a tento přístup je neekonomický.

## **Prodloužení TBO**

Malé letecké motory (Certifikace Cs-23) se vyrábějí s předem vypočítanou životností. Během provozu by neměla být zapotřebí žádná oprava motoru, pouze provádění pravidelné údržby. Po vypršení TBO (Time Between Overhaul – Doba mezi generálními opravami) motoru, musí motory do generální opravy. Při té je poprvé od výroby motoru zjištěn skutečný stav motoru. Zkušenosti výrobce ukázaly, že některé motory jsou po přijetí do generální opravy ve velmi dobrém provozuschopném stavu, u jiných je potřeba vyměnit polovinu kritických dílů. Tento model je značně neefektivní. Na základě monitorování stavu motoru během provozu a následné analýzy dat bude možné rozhodnout o zvýšení TBO motoru, tj. motor bude ponechán déle v provozu.

## **Bezpečnost**

Bezpečnost v letectví je velmi důležitá. Bezpečnost leteckého provozu je dnes na velmi vysoké úrovni. I přes to znalost aktuálního stavu pohonné jednotky a jejího opotřebení dokáže omezit vznik nečekaných událostí, a zvýšit bezpečnost.

## **Nevýhody**

### **Nedostatek sbíraných dat**

U malých dopravních letadel certifikovaných CS-23 musí je v draku letounu umístěné zařízení FDR (Flight Data Recorder), které slouží k zapisování letových dat během každého letu. FDR i přes sběr velkého množství parametrů o letadle, nemusí sbírat parametry nutné pro vyhodnocování stavu motoru. Existuje zde riziko, že data sbíraná pomocí FDR nebudou dostačující. Nedostatek sbíraných dat jde vyřešit navýšením počtu zapisovaných parametrů. Tento krok musí být technicky vyřešen pro konkrétní letadlo. Při navýšení počtu zapisovaných parametrů na palubě letadla se musí počítat s vyššími náklady. Větší počet zapisovaných dat během provádění letu, znamená složitější zpracování dat.

## **Velké finanční náklady**

Počáteční investice do zavedení systému monitorování motoru bude pro provozovatele velká, avšak v budoucnosti by měla přinést snížení nákladu na provoz motoru. Při zavádění systému pro monitorování motoru je potřeba počítat jak s náklady na hardware, tak na software.

## **Zpracování a analýza získaných dat**

Výrobci malých letadel si uvědomují, že modely, používající se pro stanovování aktuálního stavu velkých dopravních motorů, jsou velmi složité. Vyžadují mnoho měřených parametrů, které však nejsou u malých leteckých motorů dostupné. Jejich sběr pro provozovatele malých dopravních letadel je velmi nákladný a zbytečný. Bude potřeba celou koncepci zjednodušit tak, aby byla pro provozovatele malých dopravních letadel ekonomicky přijatelná. Model musí být jednoduchý, efektivní a spolehlivý. Na základě vytvořeného modelu pak, provozovatel ušetří čas i finance, zefektivní proces údržby a optimalizuje provoz malého dopravního letadla.

## **6.4 Zpracování dat**

Zpracování dat je důležitý krok, který je třeba pro vyhodnocení aktuálního stavu pohonné jednotky. Ve velké dopravě se data sbírají a vyhodnocují v režimu online. Je to nákladný proces pro malého dopravce. Proto je snahou zaměřit se na pasivní využití dostupných dat. Pasivní využití znamená, že data se budou během letu sbírat a proces zpracování se bude provádět na pozemní stanici po dokončení letu. Tato metoda je finančně výhodnější pro malé letadlo. Pro metodu pasivního zpracování se nemusí zavádět složité systémy. Je potřeba využít systémy které už letadlo má. Jeden ze systému je zapisovač FDR.

FDR je v dnešní době standard, který musí mít každé letadlo. FDR zaznamenává důležité parametry během každého letu. Tyto dataze zapisovače, lze jednoduše využít. Avšak FDR nemusí sbírat pouze data potřebné pro následne vyhodnoceni a analýzu. Proto je potřeba přesně stanovit data, které musí FDR sbírat pro následné zpracování. Po provedení letu, data ze zapisovače, budou smazaná, pokud nedojde k letecké nehodě. Proto data je potřeba stáhnou z letadla na paměťové zařízení pro následné zpracování.

Pro zpracování letových dat ve velké dopravě se využívají modely pro zpracování. Tyto modely zpracovávají velký počet dat, které nemusí být dostupné u malého letadla. Jsou příliš složité pro využití u malého letadla.

Jsou možné dva způsoby řešení. Jeden ze způsobů je, že při velkém zájmu ze strany provozovatelů, výrobce motorů může vytvořit model pro sledování stavu motoru. Na základě vytvořeného modelu, provozovatel ušetří čas a finance, zefektivní proces údržby a optimalizuje provoz malého dopravního letadla.

Druhý způsob je, že na pozemní stanicí bude zaveden personál pro zpracování a vyhodnocení sbíraných dat. Tento způsob je méně nákladný, a samozřejmě přináší výhody.

Po zpracování dat nasbíraných během letu, provozovatel dokáže jednoduše zjistit v jakém stavu je pohonná jednotka. Aktuální stav motoru je velice důležitý pro údržbu. Pokud stav pohonné jednotky je lepší, než se očekává, letadlo může zůstat delší dobu v provozu.

Snahou je zjistit v jakém stavu je pohonná jednotka po provedení letu. Pomocí systému pro monitorování lze jednoduše určit aktuální stav pohonné jednotky. Tento stav je obzvláště důležitý pro provedení generální údržby. Generální údržba je velice složitý proces a musí se provádět. Pokud ale během provozu bude zjištěno, že motor má dostatečnou rezervu, generální údržba se může odložit. A to je velice důležitý pro provozovatele.

## 7 Závěr

V současné době se optimalizací provozu malých dopravních motorů začali výrobci aktivně zabývat. Poznatky z provozních dat a jejich analýza umožňuje dosažení vyšší provozní výkonnosti a pomáhá včasnému odhalení chyb, které by později mohly vyústit v poruchu.

Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části bakalářské práce byly popsány jednotlivé části turbovrtulového motoru, princip jeho funkce a palubní diagnostika.

Podstatná část teoretické části je věnovaná monitorování parametrů. Pro ukázkou byl vybrán velký dopravní letoun a na jeho příkladu bylo popsáno, jakým způsobem se data o pohonných jednotkách sbírají a jak se vyhodnocují. Bylo zjištěno, že velká dopravní letadla sbírají a vyhodnocují data v online režimu, tedy nepřetržitě po dobu svého provozu. Je to složitý proces, během kterého je potřeba mít na palubě letadla velký počet senzorů, které tato data sbírají. Následně jsou tato data odesílána na pozemní stanici, kde model pro zpracování a analýzu dat vyhodnocuje aktuální stav pohonné jednotky.

Pro praktickou část bakalářské práce byl vybrán jeden zástupce malých dopravních letadel, a to Let L-410 (CS – 23) a jeden zástupce velkých dopravních letadel Airbus A320 (CS – 25).

Následně byla vytvořena tabulka za účelem porovnání za účelem porovnáním vybavení letounu. Z tabulky porovnání je vidět, že letoun L-410 má podstatně omezenější vybavení, např. není vybaven systémem ACARS, proto možnost online monitorování je zde obtížná. Řešením je zaměřit se na takzvaný „pasivní“ sběr a vyhodnocení dat, k čemuž lze využít data sbíraná zapisovačem FDR.

Vytvořená SWOT analýza ukazuje přínosy a možný výskyt problémů při zavedení systému monitorování parametrů do malých dopravních letadel. Ze SWOT analýzy je vidět, že zavedení monitorování přináší možnost sledování aktuálního stavu pohonné jednotky, a tedy umožňuje lépe plánovat údržbu. V případě že se bude blížit generální oprava a během provozu bude zjištěno, že motor má dostatečnou rezervu, aby zůstal v provozu, je možné potenciálně TBO navýšit. Také při zavedení systému pro monitorování parametrů dojde ke zvýšení bezpečnosti letu.

Hlavní nevýhody při zavedení systému jsou možný nedostatek sbíraných dat, problémy se zpracováním a analýzou získaných dat a k tomu potřebné vysoké finanční náklady. Jelikož je navrženo využít zapisovač FDR, je potřeba správně stanovit parametry, které se musí během letu sbírat a následně je správně vyhodnotit. Nelze využít modely používané pro

zpracování dat ve velké dopravě, resp. velkých dopravních letadlech, jelikož jsou pro zamýšlené využití přehnaně složité a využívají parametry, které nelze u malých letadel jednoduše sbírat. Proto se musí pro malá dopravní letadla / motory vytvořit nový model. S tím je spojená vysoká počáteční investice.

Cílem bakalářské práce bylo popsání problematiky monitorování parametrů leteckých motorů u malých dopravních letadel a tím přispět k optimalizaci jejich provozu. Tento cíl byl splněn a představená možnost zavedení systému pro monitorování parametrů motorů je realizovatelná a vedla by k optimalizaci provozu.

Věřím, že veškeré poznatky získané při tvorbě bakalářské práce a navržená řešení využiji i v budoucnu.



## 8 Použité zdroje

### 8.1 Literatura

- [1] FREDERIC F. Erich . *Turboprop*. McGraw-HillEducation. 2014
- [2] EL-SAYED, Ahmed F. *Aircraft propulsion and gasturbineengines*. CRC Press. 2008
- [3] HLAVAČ, Ivo; VYLEŤAL, Milan. *Dopravní letadla*. Dopravní nakladatelství. 1960
- [4] KLÍMA, Jan. *Letecké lopatkové motory: Základy konstrukce*. Ediční středisko Vysoké školy strojní a textilní. 1987
- [5] KOCÁB, Jindřich, ADAMEC, Josef. *Letadlové motory*.KANT 2000 1. vyd.

### 8.2 Internetové zdroje

- [6] Certifikační specifikace 23. [online] 2018 [cit. 26.7.2018 ] Dostupné z WWW: <<  
<http://www.caa.cz/predpisy/cs-23> >>
- [7] Airbus operationmanual. [online] 2018 [cit. 16.8.2018 ]Dostupné z WWW:  
<<<https://ru.scribd.com/document/112527126/Airbus-319-A320-A321-Fcom> >>
- [8] NASA, Turbofanengine. [online] 2018 [cit. 10.8.2018 ] Dostupné z WWW:  
<< <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/aturbf.html> >>
- [9] Airplaneflightmanualforthe L410 uvp – 20. [online] 2018 [cit.18 .8.2018 ] Dostupné z WWW: <<<http://x-plane.hu/L-410/download/L410%20Flight%20Manual.pdf>>>
- [10]ImplementationofanIntegrated On-Board Aircraft EngineDiagnosticArchitecture [online] 2018 [cit.10 .8.2018 ] Dostupné z WWW:  
<<<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120007104.pdf>>>
- [11] Letoun L – 410 [online] 2018 [cit.19.8.2018 ] Dostupné z WWW: <<<http://www.let.cz> >>
- [12] Walter M 601 [online] 2018 [cit. 20.8.2018 ] Dostupné z WWW:  
<<[https://en.wikipedia.org/wiki/Walter\\_M601](https://en.wikipedia.org/wiki/Walter_M601)>>
- [13] Faultdetection and isolation[online] 2018 [cit. 11.8.2018 ] Dostupné z WWW:  
<<[https://en.wikipedia.org/wiki/Fault\\_detection\\_and\\_isolation](https://en.wikipedia.org/wiki/Fault_detection_and_isolation)>>

[14] Turboprop [online] 2018 [cit. 9.8.2018 ] Dostupné z WWW:

<<<https://en.wikipedia.org/wiki/Turboprop>>>

[15] Implementation of an Engine Condition Monitoring tool for [online] 2018 [cit. 20.8.2018 ]

Dostupné z WWW:

<<<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/844820067124884/Thesis.pdf> >>

[16] Airbus [online] 2018 [cit. 19.8.2018] Dostupné z WWW: <<<https://www.airbus.com/>>>

[17] L-410 Turbolet [online] 2019 [cit. 29.8.2018] Dostupné z WWW:

<<[https://cs.wikipedia.org/wiki/Let\\_L-410\\_Turbolet](https://cs.wikipedia.org/wiki/Let_L-410_Turbolet)>>

[18] Dvouproudový motor [online] 2019 [cit. 29.8.2018] Dostupné z WWW:

<<[https://cs.wikipedia.org/wiki/Dvouproudov%C3%BD\\_motor](https://cs.wikipedia.org/wiki/Dvouproudov%C3%BD_motor)>>

## 9 Seznam obrázku

OBRÁZEK 1 TURBOVRTULOVÝ MOTOR WALTER M601 [12] .....	14
OBRÁZEK 2 SCHÉMA ZOBRAZUJÍCÍ ČINNOST TURBOVRTULOVÉHO MOTORU [14] .....	15
OBRÁZEK 3 LETOUN L-410, VRTULE V 510 [18].....	16
OBRÁZEK 4 SROVNÁNÍ ÚČINNOSTI POHONU PRORŮZNÉ KONFIGURACE MOTORŮ S PLYNOVOU TURBÍNOU.....	19
OBRÁZEK 5 PŘÍKLAD MODELOVÉ LOGIKY FDI PRO POHON V ŘÍDICÍM SYSTÉMU VÝŠKOVÉHO KORMIDLA LETADLA [13].....	23
OBRÁZEK 6 VYLEPŠENÁ DIAGNOSTIKA MONITOROVÁNÍ A DIAGNOSTIKA PLYNOVÝCH CEST [11].....	27
OBRÁZEK 7 ZPĚTNÁ VAZBA AIDS A ZÁZNAM POVINNÝCH PARAMETRŮ FDRS [15] .....	31
OBRÁZEK 8 ZÁKLADNÍ ARCHITEKTURA SYSTÉMU AIDS / ACMS [15] .....	32
OBRÁZEK 9 SCHÉMA SYSTÉMU PRO SBĚR DAT [15].....	33
OBRÁZEK 10 MOTOR PRATT & WHITNEY. NÁSLEDKY NADMĚRNÝCH HODNOT EGT [15].....	35
OBRÁZEK 11 EGT V RŮZNÝCH PODMÍNKÁCH MOTORU [15].....	36
OBRÁZEK 12 MYTÍ MOTORU A JEHO ÚČINKY NA EGT [15] .....	37
OBRÁZEK 13 CHARAKTERISTIKY VÝKONU PRO MOTOR JT3C-6 [15] .....	38
OBRÁZEK 14 PŘÍKLAD POKLESU ZPŮSOBENÉHO PORUCHOU NÍZKOTLAKÉHO TURBÍNOVÉHO VENTILU LPTCC, DELTA EGT MOTORU A320 [15] .....	39
OBRÁZEK 15 LET L-410 FG ČESKÉHO LETECTVA [18].....	42
OBRÁZEK 16 KOKPIT L-410 NG [17] .....	43
OBRÁZEK 17 KOKPIT AIRBUS A320.....	46

## 10 Seznam tabulek

TABULKA 1. POROVNÁVÁNÍ CHARAKTERISTIK LETADEL L – 410 A L – 410 NG [11] .....	44
TABULKA 2. POROVNÁNÍ SYSTÉMŮ A PARAMETRŮ A320 A L – 410 [16][11].....	47
TABULKA 3. SWOT ANALÝZA .....	50