



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
LETECKÝ ÚSTAV  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

ÚDRŽBA LETECKÝCH TURBÍNOVÝCH MOTORŮ  
MAINTENANCE OF JET ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

STANISLAV DRÁPAL

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

ING. MIROSLAV ŠPLÍCHAL PH.D.

SUPERVISOR

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2012/13

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Stanislav Drápal

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Údržba leteckých turbínových motorů**

v anglickém jazyce:

#### **Maintenance of jet engines**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Údržba leteckých motorů je nedílnou součástí životního cyklu motoru k zabezpečení jeho bezpečného provozu. Úkolem této bakalářské práce je popsat procesy moderní koncepce údržby turbínových motorů používaných v civilní letecké dopravě.

Cíle bakalářské práce:

Popis základních používaných koncepcí a procesů údržby leteckých turbínových motorů.  
Identifikace vývojových trendů v oblasti údržby leteckých turbínových motorů.

Seznam odborné literatury:

KOCÁB, Jindřich a Josef ADAMEC. Letadlové motory. 1. vyd. Praha: Kant, 2000, 176 s. ISBN 80-902914-0-6.

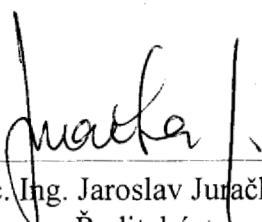
DALY, Mark a Bill GUNSTON. Jane's aero-engines. Coulsdon: Jane's Information Group Limited, 2008, 772 s.

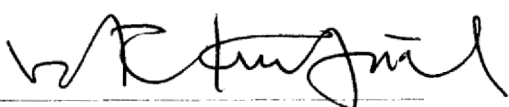
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 16.11.2012



  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
Ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou údržby leteckých turbínových motorů. V první části je čtenář seznámen s historickými souvislostmi, principem funkce a s jednotlivými typy turbínových motorů. Druhá část se zabývá cíli údržby, popisuje a porovnává jednotlivé koncepty a poukazuje na moderní trendy v této oblasti. Poslední část popisuje praktický postup provádění generálních oprav proudových leteckých motorů v podniku Letecké opravny Malešice.

## Klíčová slova

Údržba, proudový motor, letadlo, Hard-time, On-Condition, Condition monitoring.

## Abstract

This bachelor thesis relates to the problematic of jet engine maintenance. In the first part the reader is introduced to the historic context and functionality of the jet engine as well as to the various types of this engine. The second part relates to the problematic of maintenance, shows and compares different concepts and shows modern trends in this field. The last part is based on my visit in Letecké opravny Malešice, and shows practical methods used during overhauls of jet engines.

## Keywords

Maintenance, jet engine, airplane, Hard-time, On-Condition, Condition monitoring

## Bibliografická citace

DRÁPAL,S. *Údržba leteckých turbínových motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 41 s. Vedoucí práce Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D..

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem byl seznámen s předpisy pro vypracování bakalářské práce, a že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Miroslava Šplíchala, Ph.D.

V Brně dne 24.5.2013



Stanislav Drápal

## Poděkování

Děkuji tímto Ing. Miroslavu Šplíchalovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce a za vstřícný a trpělivý přístup při konzultacích.

Poděkování patří také panu Ing. Jiřímu Hlúže, řediteli závodu letecké techniky, a panu Ing. Pavlu Pánkovi, vedoucímu technických útvarů, za trpělivost a cenný čas, který mi věnovali při prohlídce v podniku Letecké opravy Malešice

---

## Obsah

1. Úvod.....	10
2. Turbínové motory .....	11
2.1 Vznik turbínových motorů.....	11
2.2 Princip.....	12
2.3 Druhy leteckých turbínových motorů .....	14
2.3.1 Jednoprúdový motor (turbojet) .....	14
2.3.2 Dvouproudový motor (turbofan) .....	15
2.3.3 Turbovrtulový motor (turboprop) .....	16
2.3.4 Propfan.....	16
3. Údržba leteckých motorů.....	18
3.1 Cíle údržby .....	18
3.1.1 Dostupnost .....	18
3.1.2 Bezpečnost .....	18
3.1.3 Ekonomičnost .....	20
3.2 Koncepty údržby .....	21
3.2.1 Tradiční metoda Hard - Time .....	22
3.2.2 Údržba on-condition .....	23
3.2.3 Monitorování stavu motoru - Engine condition monitoring (ECM).....	23
3.3 Způsoby údržby .....	25
3.3.1 On – wing údržba.....	25
3.3.2 Off - wing opravy a generální opravy.....	26
3.4 Hlavní důvody demontování motoru .....	27

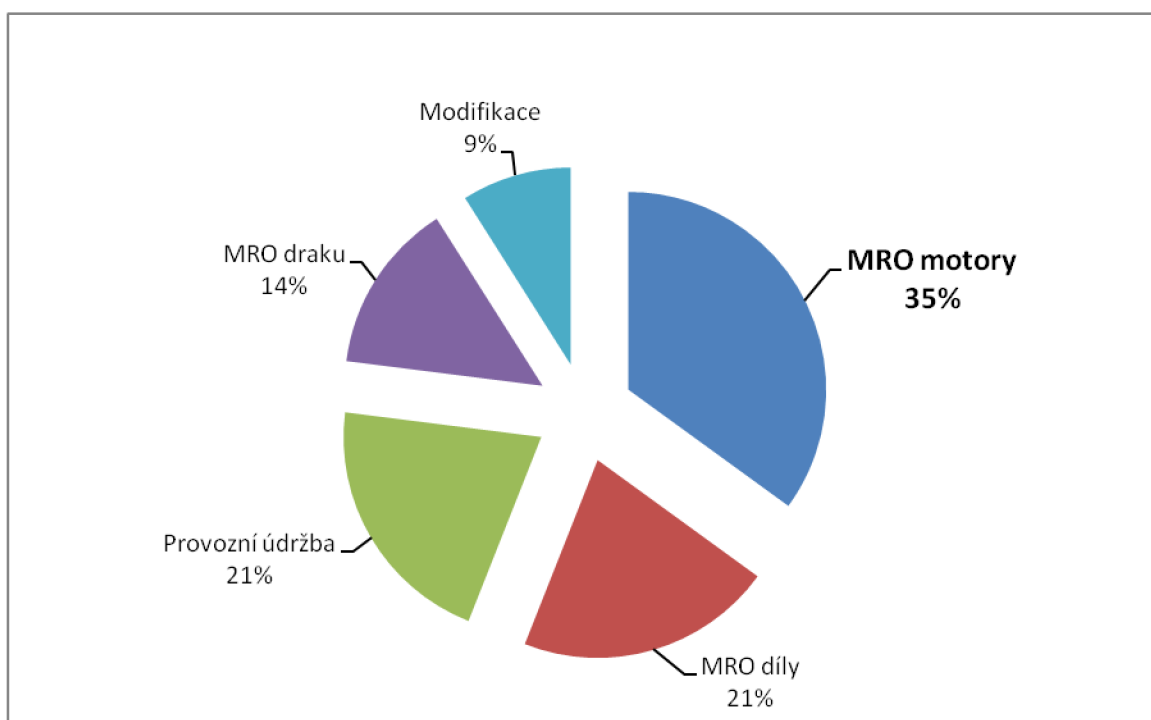


---

3.4.1	Zvýšená teploty výstupních plynů .....	27
3.4.2	Konec životnosti částí s pevně danou životností .....	28
3.4.3	Opotřebení jednotlivých částí .....	28
3.4.4	Jiné neplánované důvody .....	29
3.5	Management údržby .....	29
4.	Praktický průběh oprav v podniku Letecké opravny Malešice (LOM) .....	31
4.1	Převzetí do opravy .....	31
4.2	Demontáž a čištění .....	31
4.3	Kontrolně technologický nález .....	32
4.4	Montáž .....	35
5.	Závěr .....	39
6.	Seznam použité literatury .....	40

## 1. Úvod

Letecká doprava prošla za uplynulé století velkým množstvím změn, stala se neodmyslitelnou součástí naší společnosti. Počet přepravených cestujících každoročně roste. Současně jsou však aerolinie vystaveny stále většímu konkurenčnímu boji. Z tohoto důvodu se objevuje snaha ušetřit co nejvíce finančních prostředků při zachování či zvýšení bezpečnosti. Oblastí, kde se dá ušetřit, je nepřehledné množství - od volby méně frekventovaného letiště, až po přidávání sedadel do kabiny pro cestující. Druhou největší položkou promítající se do ceny hned za samotným provozem letadel, jsou však opravy a údržba (asi 15% nákladů).[15]



*Graf 1: Náklady na opravy a údržbu letadla. MRO (Maintenance & Repair & Overhaul) znamená v češtině údržba, opravy a generální opravy. [7]*

Údržba je nezbytnou součástí zajištění provozuschopnosti každého letadla. Z grafu je patrné, že letecké turbínové motory jsou nejnákladnějším komponentem v údržbě dopravního letadla. Cílem této bakalářské práce je popsat jednotlivé koncepty údržby a ukázat údržbu leteckých turbínových motorů jako klíčovou činnost v provozu letadel, která svými požadavky na management, technologické postupy a finance, předčí jakoukoli jinou část moderního dopravního letadla.

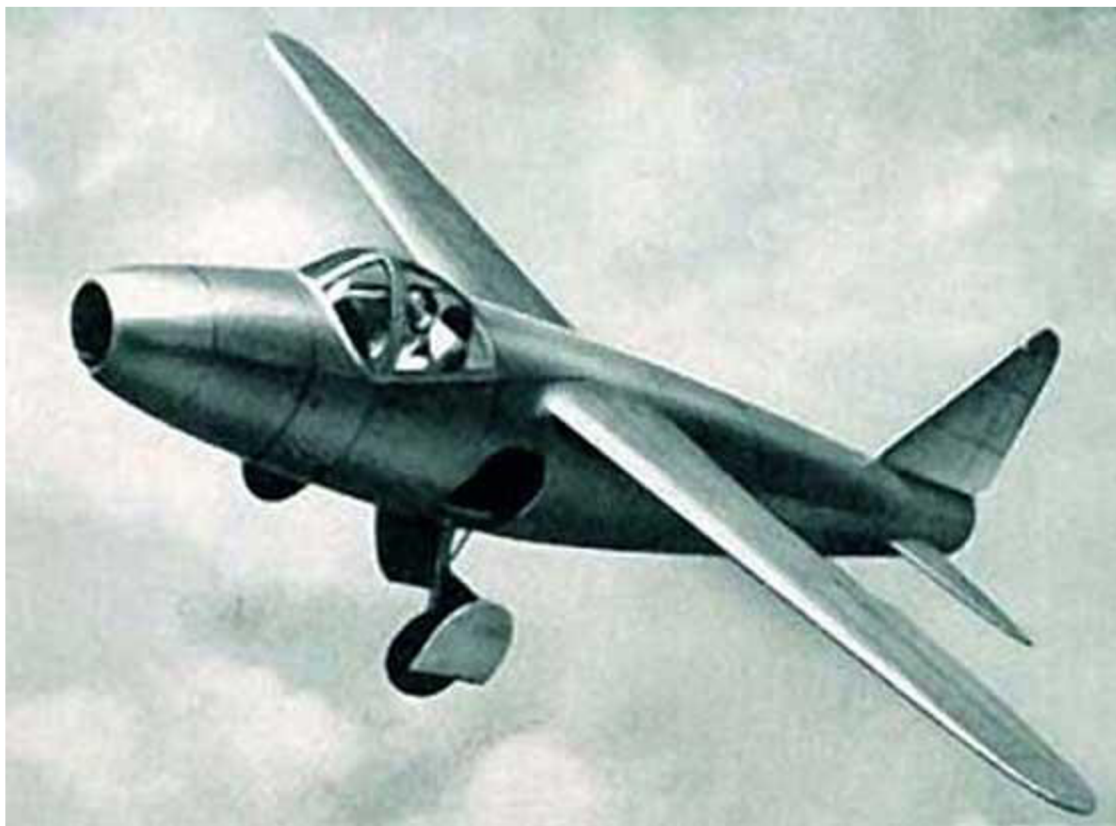
První část mé práce pojednává o vzniku, vývoji a typech turbínových motorů.

## 2. Turbínové motory

Jednoduché mechanismy poháněné turbínou se začínají objevovat již na začátku devatenáctého století. Skupina turbínových motorů je charakteristická použitím turbosoustrojí, kdy turbína přeměňuje tepelnou energii spalín na mechanickou sloužící k pohonu kompresoru a eventuálně užitečné zátěže. Zbývající energie spalín je využita k jejich urychlení.

### 2.1 Vznik turbínových motorů

Po prvních úspěšných letech poháněných pístovými motory na začátku dvacátého století, začali konstruktéři uvažovat, zda by se dal turbínový motor využít k pohonu letadel. Pohon pístovými motory neumožňuje dosažení vysokých rychlostí. Při rychlostech nad 600 km/h vrtule rychle ztrácí účinnost a je třeba k pohonu použít velmi výkonných motorů. Tento problém může vyřešit reaktivní pohon. Teoretické znalosti a principy reaktivního pohonu byly známy dlouho před dosažením potřebné technické vyspělosti, která umožnila realizovat první letecké turbínové motory. Až v předválečných letech, kdy nastal rozvoj techniky, se zvětšily technické možnosti natolik, aby bylo možno zkonstruovat letoun s proudovou pohonnou jednotkou. První pilotovaný let poháněný turbínovým motorem se uskutečnil v srpnu roku 1939, a to na německém letounu Heinkel He 178. [19]



*Obr. 1: Německý letoun Heinkel He 178 poháněný proudovým motorem[1]*

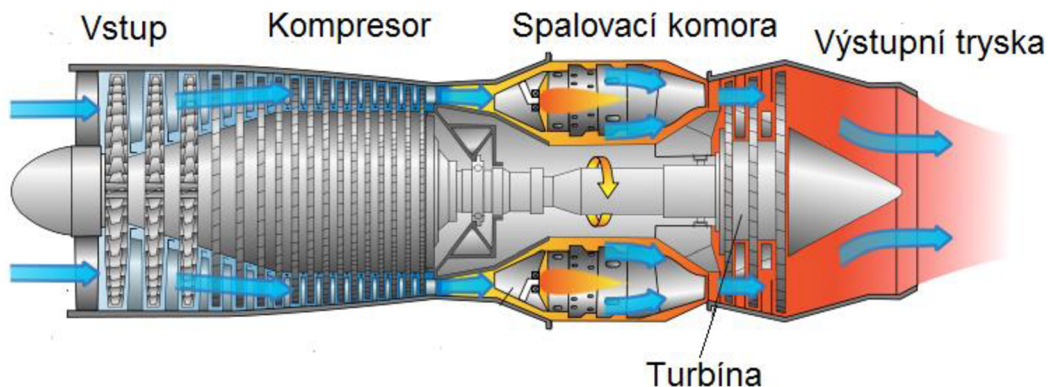
Následujících šest válečných let posunulo techniku dopředu a již v roce 1952 jsou na první komerční lince nasazeny letouny s turbínovými motory. Od té doby prošly tyto pohonné jednotky mnoha změnami a v dnešní době je využíváno mnoho druhů, které však sdílí jeden základní princip.



*Obr. 2: První civilní proudový letoun de Havilland DH 106 Comet[2]*

## 2.2 Princip

Turbínové motory jsou založeny na Newtonově principu akce a reakce, kdy se na vstupní části motoru nasává vzduch a pomocí několikastupňového kompresoru je stlačován. Následně je přiveden do spalovací komory, kde se jeho část smísí s palivem. V důsledku hoření paliva, ideálně za konstantního tlaku, vzrůstá teplota plynů a ty pak opouštějí spalovací komoru a jsou přivedeny na lopatky turbíny. Zde probíhá expanze plynu, kdy je tepelná a tlaková energie plynu přeměna na energii kinetickou. Část této energie turbína mění na mechanickou práci použitou pro pohon kompresoru. Za turbínou však spaliny mají stále vyšší tlak než okolní atmosféra, a jsou dále vedeny do hnací trysky. Tam se tepelná a tlaková energie mění na kinetickou, což způsobuje tah motoru.[18]



Obr. 3: Obrázek znázorňující princip funkce proudového motoru [3]

Síla, která tlačí motor vpřed, je vyvozena z urychlení vzduchu, který motorem prochází. Jde tedy o rozdíl hybnosti vzduchu z motoru vystupujícího a do motoru vstupujícího. Rovnici tahu pohonné jednotky tedy můžeme zapsat:

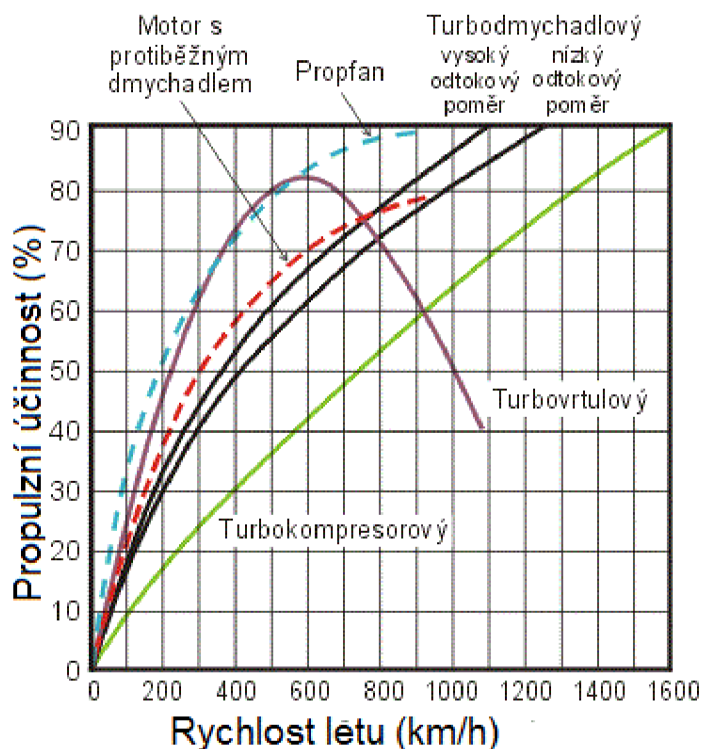
$$F = m \cdot (C_1 - C_0) \quad [\text{N}]$$

$m$  – hmotnostní tok vzduchu [kg/s]

$C_1$  – výstupní rychlost plynů [m/s]

$C_0$  – vstupní rychlost vzduchu [m/s]

Z rovnice je patrné, že chceme-li zvýšit tah motoru, musíme buďto zvětšit urychlení vzduchu, nebo zvýšit hmotnostní tok. Ale s vyšší rychlostí výstupních plynů klesá propulzní účinnost. Ta se dá nejjednodušeji definovat jako poměr energie v tahu motoru k energii využitě k pohonu letounu. Záleží především na poměru rychlosti výstupních plynů k cestovní rychlosti letounu. Čím menší tedy tento poměr je, tím vyšší je propulzní účinnost, z čehož jasně plyne, že snížením rychlosti plynů na výstupu z motoru, při udržení stejné rychlosti letu, dosáhneme vyšší propulzní účinnosti. Pokud chceme snížit rychlost plynů a zachovat stejný tah, musíme zvýšit hmotnostní tok vzduchu motorem. [20]



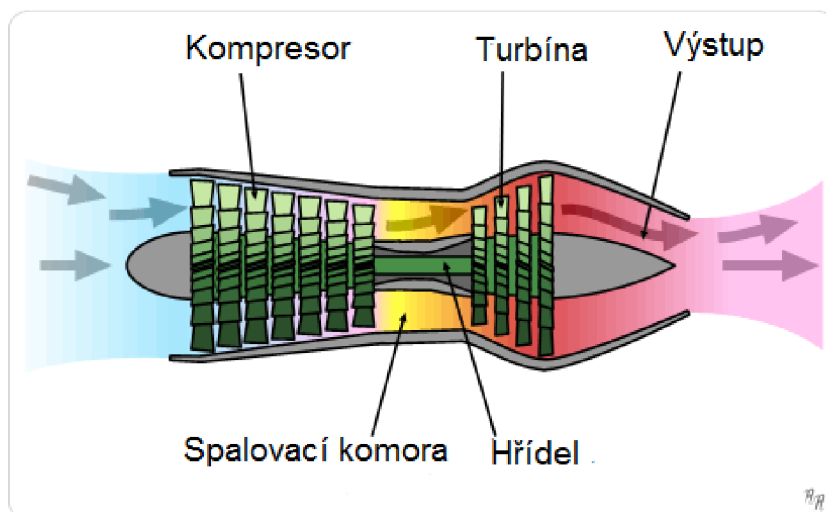
Graf 2: Srovnání jednotlivých druhů leteckých turbínových motorů v závislosti propulzní účinnosti na rychlosti letu. [5]

## 2.3 Druhy leteckých turbínových motorů

V současné době se na základě tohoto principu využívají dva způsoby získání tahu. V prvním způsobu jsou horké a vysoce stlačené plyny za turbínou ještě urychleny výstupní tryskou, což žene motor vpřed. Druhým způsobem je využití kinetické energie proudících plynů zejména k roztočení hřídele, která pohání například vrtuli. Z těchto dvou konfigurací se vyvinuly následující druhy turbínových motorů.

### 2.3.1 Jednoprúdový motor (turbojet)

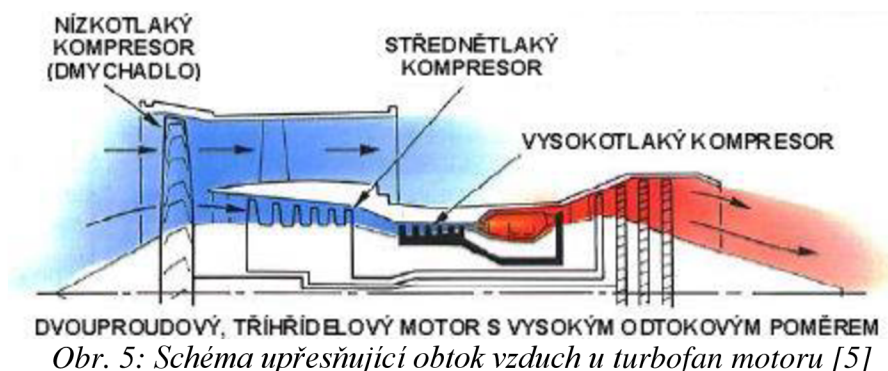
Motory typu turbojet jsou vývojově nejstarší a nejjednodušší. Vzduch na vstupu je stlačen kompresorem (axiálním, radiálním nebo oběma) a ve spalovací komoře smíchán s palivem. Tato směs se následně vznítí a horký vysoko stlačený plyn odchází přes turbínu, kterou roztáčí, výstupní tryskou. Motor přemění veškerou vnitřní energii paliva na kinetickou energii horkých plynů vystupujících výstupní tryskou, čímž vzniká tah. Všechn vstupující vzduch prochází kompresorem, spalovací komorou, turbínou i výstupní tryskou. Nevýhodou těchto motorů je nízká efektivita a vysoká spotřeba paliva. V dnešní době se v civilním letectví již prakticky nepoužívají, své uplatnění však stále nachází u vojenských letounů, kde je ještě vybaven komorou přídavného spalování. [20]



Obr. 4: Princip funkce motoru typu Turbojet [4]

### 2.3.2 Dvouproudový motor (turbofan)

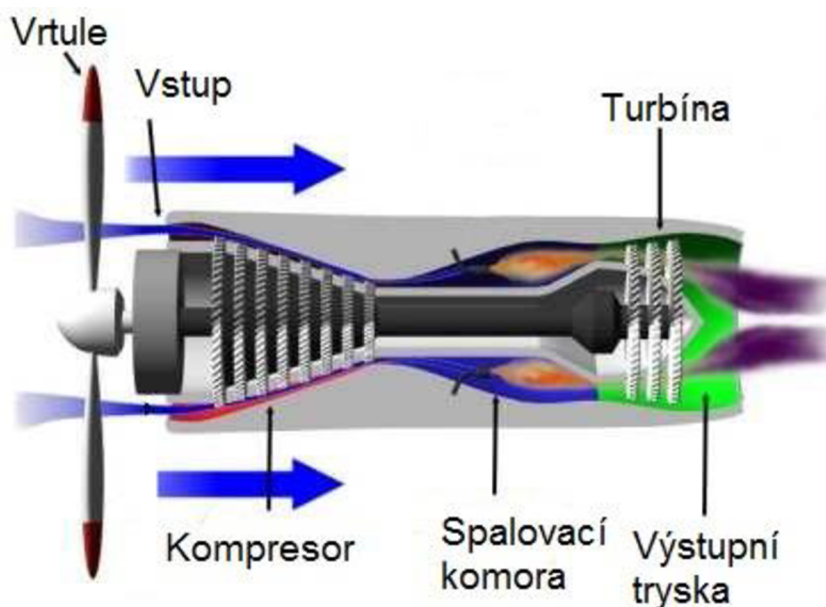
Motor typu turbofan je de facto turbojet vybavený dmychadlem. To je umístěno hned na vstupu, nasává vzduch, jehož část je dále stlačena kompresorem a pokračuje dále jako u turbojet motoru do kompresorového úseku, a druhá část vzduchu obtéká jádro motoru a je vyvedena ven tryškou, před kterou se ještě smíchá s plynem ze spalovací části motoru. Poměr mezi vzduchem procházejícím motorem a obtékajícím vzduchem se nazývá obtokový poměr. Tah motoru je tedy vyvolán účinkem obou proudů plynu. Turbofan motorem prochází výrazně více vzduchu než turbojet motorem, díky čemuž je rychlost výstupních plynů při stejném výkonu nižší. To vychází z již zmíněné rovnice tahu. Jedná se o nejčastěji používaný typ motoru v dopravním letectví, a to zejména díky tomu, že jsou obvykle méně hlučné a mají nižší spotřebu paliva. [5],[7]



Obr. 5: Schéma upřesňující obtok vzduch u turbofan motoru [5]

### 2.3.3 Turbovrtulový motor (turboprop)

Doby, kdy si někteří mysleli, že letadla poháněná vrtulí nemají v moderní letecké dopravě místo, jsou dávno pryč. Snaha o zkonstruování turbínového leteckého motoru s nízkou spotřebou paliva, vedla právě k vývoji této pohonné jednotky. Motory typu turboprop mají mnoho společného s turbojet motory.



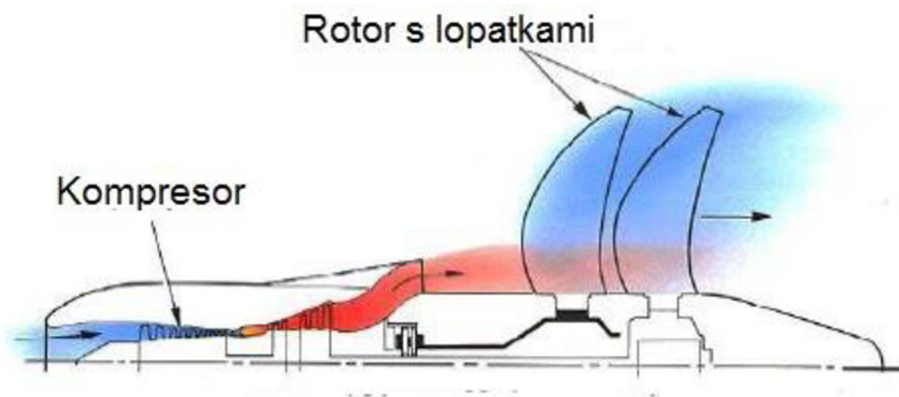
Obr. 6: Turboprop motor [6]

Hlavní rozdíl je v tom, že cílem je převést co nejvíce kinetické energie horkých plynů na turbínu, která přes hřídel a převodovku roztáčí vrtuli. Tah je tedy získáván jednak pomocí vrtule a zároveň stejným způsobem jako u turbojet motorů. Obecně se dá říci, že turboprop motory mají při nižších rychlostech vyšší účinnost než turbojet nebo turbofan motory, ale při vyšších rychlostech se zvyšuje jejich hloučnost a snižuje účinnost vrtule.[20]

### 2.3.4 Propfan

Jedná se o motor, u něhož se objevuje snaha zkřížit dohromady výhody turbofan a turboprop motorů. Tomuto motoru se také přezdívá ultra-high-bypass nebo také open-rotor a byl otestován ve dvou variantách - s vrtulí umístěnou před a za spalovací komorou. [18]





Obr. 7: Schematické zobrazení proudu vzduch v motorech typu propfan [5]

Vyznačuje se vysokou efektivitou a nízkou spotřebou paliva a to i při rychlostech těsně pod rychlostí zvuku. Avšak nízké ceny paliva v době vývoje a vysoké náklady na výrobu, celý projekt pozastavily. Dalším problémem pak byla vysoká hlučnost. Až současné ceny leteckého paliva a ekologické smýšlení, vedou ke znovuoživení celého konceptu a myslím, že v blízké budoucnosti se dočkáme prvních komerčních letů poháněných propfan motory. S využitím moderní výpočetní techniky se také pracuje na snížení hlučnosti. Společnost EasyJet si nechala patentovat koncept dopravního letadla budoucnosti se dvěma propfan motory umístěnými na zadní části letounu.[13]



Obr. 8: Společnost v roce 2007 předvedla tento koncept, s tím, že kolem roku 2015 by mohl být hotov prototyp. Od té doby je celý projekt zahalen tajemstvím, mnozí však spekulují, že se jednalo pouze o marketingovou akci, která měla nabudit přední výrobce letadel jako je Airbus či Boeing ke konkurenčnímu boji, a tedy i urychlit vývoj letadla s tímto pohonem.[13]

## 3. Údržba leteckých motorů

Tato část práce by měla dát celkový náhled na problematiku údržby leteckých motorů a měla by čtenáře seznámit s jednotlivými cíli, metodami a postupy. Letecký motor je důležitým prvkem každého letadla a to jak co se týče nákladů na pořízení, provozních nákladů tak i komplexity. Údržba motoru má vlastní rozvrh, který se často liší od rozvrhu údržby zbytku letadla.

### 3.1 Cíle údržby

Údržba je klíčovou činností pro každý mechanismus a v letectví je jejím hlavním cílem zajištění provozuschopnosti letadla a bezpečnosti. Vedlejším cílem, který však stále více nabývá na významu, je zajištění ekonomičnosti provozu.

#### 3.1.1 Dostupnost

Údržbu lze chápat jako logistické úsilí o zajištění provozu a podílí se na tom, aby bylo letadlo co nejvíce času dostupné a připravené. V civilním letectví pak nedostupnost letadla způsobuje zpoždění nebo rušení letů, což vede k nižším výdělům. U vojenských letadel nedostupnost přímo ovlivňuje připravenost bojové jednotky reagovat na různé situace. [7]

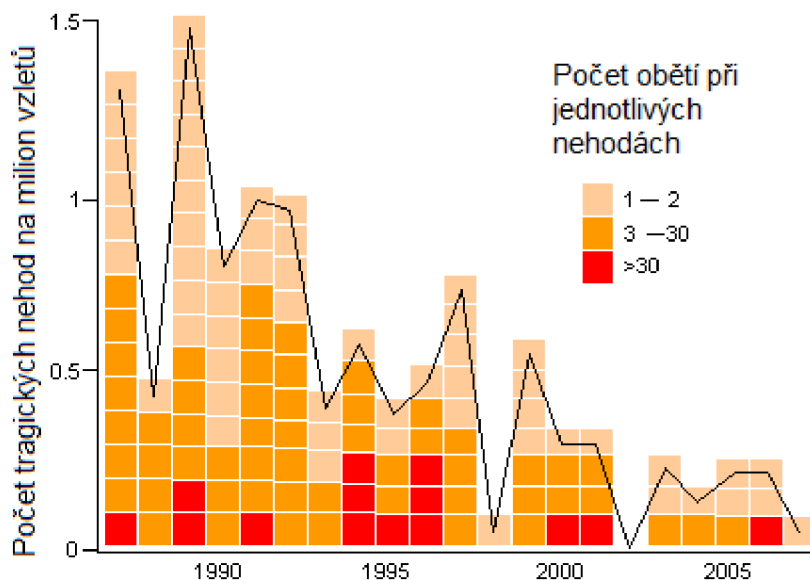
Dostupnost má veliký vliv na procesy a způsoby provádění údržby turbínových motorů. Za účelem dosažení co nejvyšší dostupnosti se letecké společnosti snaží minimalizovat čas, kdy je letadlo nezpůsobilé letu. Nezpůsobilost je způsobena poruchou a znamená, že motor není schopen provozu a letadlo musí zůstat na zemi. Čas, kdy je letadlo na zemi, lze rozložit na tři části: Čas opravy, logistika a administrativní práce. Je vyvíjen tlak na to, aby čas jednotlivých částí byl snížen na minimum. [7]

Samotný čas opravy se již velmi těžko snižuje, protože je vždy potřeba zachovat přesné postupy předepsané výrobcem, které se vztahují k dané součásti. Logistika je čas spojený například s dopravou motoru z a do hangáru, dodávkou náhradních dílů apod. Dá se zkrátit například udržováním širokých skladových zásob náhradních dílů, což je však velmi nákladné a náročné na prostor. Administrativní práce se liší společností a snahou zůstává snížit administrativu na minimum při zachování vysoké bezpečnosti, a to například tím, že personál provádějící jednotlivé úkony je vybaven čipovými kartami a každá součást má svoji elektronickou průvodní listinu, takže odpadne zbytečné vyplňování formulářů apod. [16]

#### 3.1.2 Bezpečnost

Údržba jako taková je součástí životního cyklu každého mechanismu. U jednoduchých mechanismů jako jsou například domácí spotřebiče, kde nehrozí případné přímé nebezpečí, se údržba provádí většinou až po poruše. V letectví se však tento přístup praktikovat nedá, a z toho důvodu se v průběhu rozvoje letectví začaly vyvíjet jednotlivé koncepty údržby. Primárním důvodem, proč se vůbec údržba jako taková

začala praktikovat, byla snaha o zvýšení bezpečnosti letectví. Statistiky Amerického úřadu pro bezpečnost v dopravě NTSB (National Transportation Safety Board) ukazují, že díky tlaku veřejnosti a přísným nařízením, se letectví stává nejbezpečnější formou dopravy. I přesto je však její pozice v očích veřejnosti nestálá, což je dáno zřejmě velkou medializací všech leteckých událostí. [17]



Graf 3: Z grafu je patrné snížení počtu tragických nehod na přelomu tisíciletí [17]

Podle Amerického úřadu pro civilní letectví (FAA) bylo v USA od roku 1994 do roku 2012 42% leteckých nehod, při kterých došlo ke ztrátám na životech, zapříčiněno nesprávnou údržbou, z toho 18% je přičítáno nesprávné údržbě motorů. [17]

Je otázkou, zda by důslednější údržbou šlo zamezit i medializované nehodě letu Qantas 32, při kterém dne 4. listopadu 2010 explodoval moderní Airbus A-380 motor číslo dva (Rolls-Royce Trent 900). Úlomky vymrštěné výbuchem pak poškodily potah křídla a způsobily další problémy. Letadlo nakonec úspěšně nouzově přistálo na letišti v Singapuru. Vyšetřování ukázalo, že nehoda byla způsobena únavovými trhlinami v olejovém potrubí motoru, kterými unikl olej, který se následně vznítil. Vyšetřovatelé dosud nejsou zajedno, zda by důkladnější inspekční prohlídky u nového motoru mohly zamezit této havárii, nebo jestli se jednalo o výjimečnou výrobní vadu. [8]

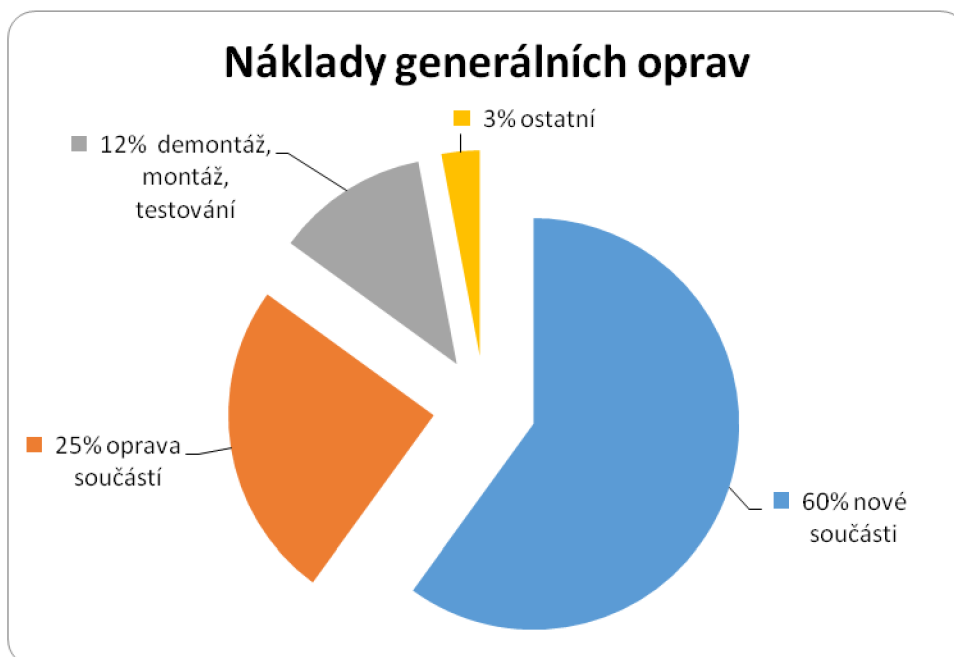


Obr. 9: Fotografie ukazuje rozsah poškození motoru Trent 900 letu Qantas 32 [8]

### 3.1.3 Ekonomičnost

Snižování celkových nákladů je dalším z cílů údržby leteckých motorů. Jak již bylo řečeno v úvodu této práce, údržba letounu je druhou největší položkou promítající se do celkových nákladů na provoz letadla. Jedním z nejtěžších úkolů dnešní údržby letadel je nalezení správného poměru mezi ekonomičností a bezpečností - údržbu je potřeba provádět co možná nejekonomičtěji, ale zároveň tak, aby nebyla snížena bezpečnost. [15]

Náklady na údržbu motorů se obvykle skládají z ceny pracovní síly, ceny náhradních dílů, dopravy a režijních nákladů. Obecně vzato, uzemněné letadlo stojí leteckou společností peníze, tedy snížení času, kdy je motor mimo provoz, zvýší dostupnost a sníží cenu údržby. [16]



Graf 4: Graf zobrazuje rozložení nákladů na provedení generální opravy.[7]

Generální oprava je nevyhnutelnou součástí života každého fungujícího leteckého motoru. Z grafu je patrné, že 60% veškerých nákladů vynaložených na tuto opravu je investováno do nových součástí. Moderním trendem je, aby se toto číslo snižovalo, aby rostl podíl součástí, které budou opraveny a vráceny zpět do provozu.

svěšení	Interval [počet vzletů]	Cena [\$]	Cena za jednu letovou hodinu [\$]
1.	13 000	2 035 000	106
2.	12 000	2 431 000	130

Tab. 1: Přibližná cena generálních oprav motorů CFM 56-7B26.[15]

Tabulka ukazuje finanční náročnost generálních oprav a zejména pak ukazuje, že s rostoucím věkem leteckého motoru roste i cena jeho údržby. S věkem se i zkracuje interval mezi jednotlivými návštěvami opravárenských podniků. Poslední sloupec pak představuje přepočtenou celkovou cenu generální opravy na jednu letovou hodinu.

### 3.2 Koncepty údržby

Údržba leteckých pohonných jednotek je složitá a komplexní činnost, která od počátku letectví prošla a nadále prochází vývojem. Za druhé světové války, když byl poprvé v boji nasazen německý stíhací letoun Messerschmitt Me 262 poháněný dvěma proudovými turbojet motory Junkers Jumo-004, se údržba těchto motorů u operačních jednotek de facto neprováděla. Motory měly z důvodu technologických zjednodušení, způsobených nedostatkem materiálů, pevně stanovenou životností 25 letových hodin (původně byla životnost stanovena na 200 hodin), poté byly demontovány a odvezeny do dílen, kde byly rozebrány a byla na nich provedena generální oprava. Ta však nebyla

vždy dokonalá jednak z toho důvodu, že se jednalo o průlomový motor, a metody tak byly většinou průkopnické, a jednak z důvodu nedostatku vhodných materiálů a odborné pracovní síly, a tak se nezdálo, že se motory vznítily už po několika hodinách služby. [19]



*Obr. 10: Messerschmitt Me 262, na směrovce a na trupu jsou zřetelně vidět výsostné znaky, dokazující původ tohoto letounu [10]*

Tento přístup je typický pro metodu Hard - time - údržba je prováděna v pevně stanovených intervalech. Druhým základním konceptem využívaným v civilním letectví, je údržba řízená spolehlivostí. Tento koncept můžeme rozdělit do dvou skupin - On - condition - dle skutečného stavu a Engine condition monitoring - monitorování stavu motoru. [14]

### 3.2.1 Tradiční metoda Hard - Time

Základním předpokladem tohoto konceptu je fakt, že v čase roste opotřebení, a zvyšuje se riziko vzniku poruchy. Jednotlivé součásti leteckého lopatkového motoru mají tedy výrobcem pevně danou dobu, do kdy je riziko vzniku poruchy minimální a po uplynutí tohoto časového úseku musí dojít k výměně. Demontovaná součást může být následně opravena a znovu použita. Časové úseky do výměny jsou voleny tak, aby riziko vzniku poruchy bylo minimální, i když většina součástí by po uplynutí této doby mohla nadále bezpečně fungovat. Právě tato nevyčerpaná životnost snižuje

ekonomickou výhodnost tohoto konceptu, a moderním trendem je od této metody upouštět. Stále jsou však v moderních leteckých lopatkových motorech součástí s pevně danou životností. Jedná se zejména o celky, které mají bezprostřední vliv na bezpečnost, anebo je nemožné zjistit blížící se poruchu. Snahou výrobců těchto pohonných jednotek je tedy motor konstruovat tak, aby výměna součástí s pevně danou životností mohla být provedena co nejrychleji a nejefektivněji. Nevýhodou tohoto konceptu jsou také dlouhé prostoje, avšak u armády je tato metoda stále velmi běžnou. Časová náročnost se však dá zkrátit využitím modulární konstrukce motoru, kdy se celý blok, ve kterém se poškozená součást nachází, vymění za jiný, například ze skladových zásob.[14],[7]

Ke snížení počtu dílů s pevně danou životností se v letectví na začátku 70. let začala využívat metoda MSG-3 (Maintenance Steering Group-3) - skupina řízení údržby - 3. Využívá se při zavádění nového letadla či motoru do provozu a její podstata spočívá v tom, že se na základě dosavadních zkušeností s obdobnými součástmi zkoumají následky selhání dané součásti. Třemi pilíři této metody jsou následky selhání součástí, které jsou logicky v pořadí: bezpečnost, provozní schopnost a ekonomičnost. Pokud MSG-3 analýza prokáže určité selhání součásti, které by ohrozilo bezpečnost, a tento druh selhání nelze odstranit, musí se změnit konstrukce dané součásti. Tato metodika pomáhá zvyšovat bezpečnost zaměřením se na skrytá selhání v provozu. [22]

### 3.2.2 Údržba on-condition

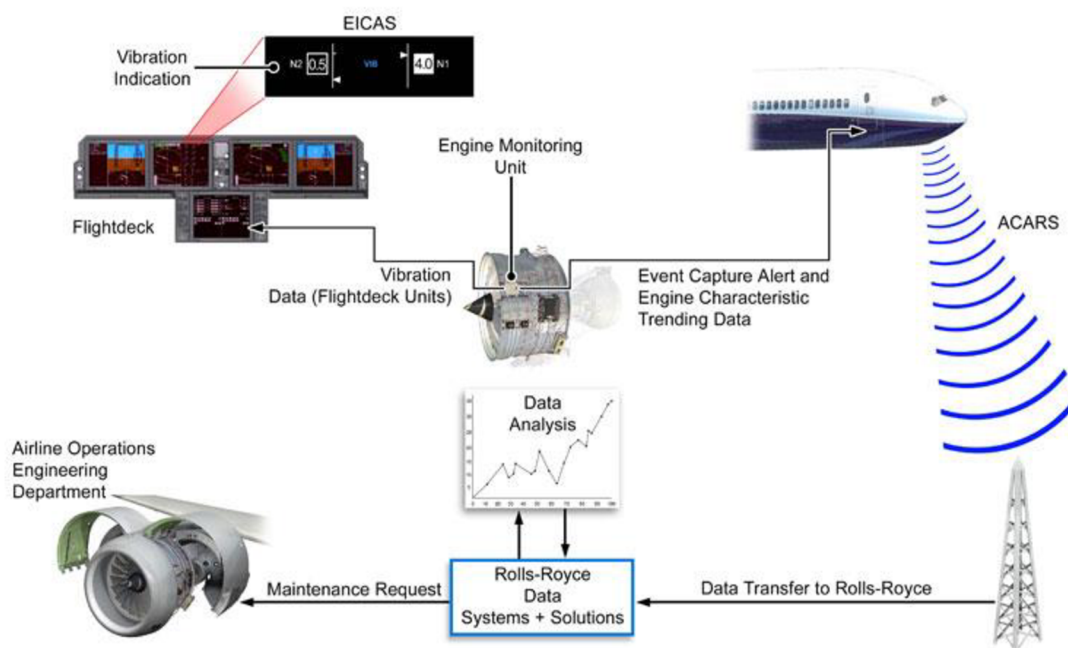
Do češtiny lze tento pojem přeložit jako údržba *dle stavu* a je založena na plynulé nebo periodické kontrole stavu jednotlivých částí letecké pohonné jednotky. Údržba je prováděna pouze v případě poruchy či v případě, že monitorovaný stav motoru se odchyluje od normálu. Výhodou tohoto konceptu je maximální využití životnosti většiny součástí, úspora materiálu a časových prodlev. Nevýhodou jsou pak vyšší pořizovací náklady diagnostických přístrojů či monitorovacích jednotek. Součástí tohoto konceptu je monitorování stavu motoru, které bude popsáno v následující kapitole. [7]

### 3.2.3 Monitorování stavu motoru - Engine condition monitoring (ECM)

V dřívějších dobách byly posádky dopravních letadel povinny monitorovat základní parametry motoru přímo z přístrojové desky. Zapsaná data byla dále předávána inženýrům dané letecké společnosti, a ti podle nich stanovovali údržbové postupy pro daný motor. Nevýhodou bylo, že data byla zaznamenávána pouze při startu (kdy motor podává nejvyšší výkon) a jedenkrát již v dané letové hladině.[14]

V dnešní době jsou ECM informace zaznamenávány automaticky a jsou v reálném čase odesílány do operačního střediska, které danému letadlu zajišťuje údržbu motorů. Tyto informace zahrnují například hodnoty tlaku oleje, vibrace motoru, teplotu výstupních plynů, tlakový poměr a i parametry, které napovídají o letových podmínkách, jako je výška, rychlost či teplota vzduchu.[14]

Hlavním úkolem ECM je vykreslit komplexní obraz o tom, jak se motor za dané situace chová a porovnat jej s tím, jaké chování je od něj za daných podmínek očekáváno. Odchytky od očekávaných parametrů mohou poukazovat na zhoršení stavu motoru. Kombinace změn specifických parametrů jsou známy jako ukazatelé specifických problémů. Získaná data mohou být tedy použita k tomu, aby se zjistilo, ve které části motoru došlo k problému. Tato analýza je opět v reálném čase prováděna speciálním ECM softwarem. Spolu s motorem si zákazník může koupit službu, kdy výrobce z analyzovaných dat vyvodí závěry, které předá provozovateli, a ten podle nich může optimalizovat údržbu. Pokud si službu nepřikoupí, musí se držet standardních plánů údržby.[7]



*Obr. 11: Schéma zobrazující, jakým způsobem firma Rolls-Royce vyřešila problematiku ECM. Data z motoru jsou shromažďována v jednotce monitorování motoru (Engine monitoring unite), odkud jsou odesílána jak do kokpitu, kde se pilotům zobrazí na přístrojové desce (Flightdeck), tak přes komunikační systém (ACARS) na zem, odkud jsou odeslána do systémového oddělení firmy (Rolls-Royce Data Systems + Solutions), kde jsou analyzována (Data Analysis). Z rozebraných dat se pak pro oddělení technického zabezpečení (Airline Operation Engineering Department) vytvoří požadavek na údržbu (Maintenance Request).[11]*

Do oblasti monitorování stavu motoru patří ještě další metody. Jednou z nich je inspekce boroskopem, která kontroluje mechanický stav vnitřních částí. Jedná se o nedestruktivní optickou metodu, při které se využívá boroskop - diagnostické zařízení, které se skládá z ohebné trubičky a optiky, která osvětluje a zvětšuje. Používá se k prozkoumávání těžko dosažitelných vnitřních částí motoru a k odhalování únavových trhlin či koroze.[16]



ECM umožňuje využívání On - condition metody u leteckých motorů. Napomáhá k určení, kdy má být motor odeslán na plánovanou, ale i na neplánovanou opravu. Správným využitím ECM systému se dá zvýšit čas motoru na křídle.

### 3.3 Způsoby údržby

#### 3.3.1 On – wing údržba

On – wing údržba motorů zahrnuje všechny inspekční a údržbářské úkony, které mohou být provedeny, aniž by bylo potřeba sejmout motor z křídla, a jako taková, bývá obvykle zahrnuta v plánované provozní údržbě letadla. Můžeme ji rozdělit na dva hlavní úkoly: Monitorování stavu motoru a opravy či výměny.[7]



Obr. 12: On - wing údržba [9]

Monitorování stavu motoru je důsledkem využívání metody on - condition. Hlavním cílem je získávání a analyzování hlavních operačních parametrů a stavu uvnitř motoru, za účelem identifikování potenciálních problémů před tím, než se stanou vážnými. Získaná data pomáhají stanovit, kdy bude neekonomičtější motor odstavit a poslat jej na opravu.

Moderním trendem je provádět co nejvíce oprav a výměn, když je motor na křídle. Současné motory jsou navrhovány tak, aby co nejvíce částí bylo dosažitelných, aniž by motor musel být sejmout a rozebrán, což značně zvyšuje Time on - wing (čas na křídle).

Životnost leteckých motorů většinou daleko převyšuje intervaly, v jakých jsou odesílány na opravy. To je dáno zejména selháním jednotlivých komponentů, či

neočekávaným poškozením. Například dmychadlo motoru typu turbofan je velmi často prvním místem, které je poškozeno například nasáním ptáka, či drobných částí z plochy letiště. Výše popsany systém ECM je schopný takovýto problém odhalit a pomoci inženýrům údržby rozhodnout, zda je možné provést On - wing opravu či výměnu. Moderním trendem ve výrobě leteckých turbínových motorů je snaha o provedení co nejvíce oprav a výměn, aniž by motor musel být demontován. V konečném důsledku je však generální oprava nevyhnutelná. On - wing opravy však přispívají k přiblížení času motoru na křídle co nejvíce k jeho životnosti.[7]

Do této kategorie zapadají také části, u kterých je požadována častá výměna. Jsou to části, které jsou konstruovány tak, aby byly rychle a jednoduše vyměnitelné za provozu, a které jsou většinou nezávislé na okolí. Jedná se například o senzory, filtry či těsnění.

Další způsob, kterým se dá prodloužit čas motoru na křídle, je prostřikování motoru vodou. Provádí se tak, že do roztočeného, ale neběžícího (tj. neprobíhá spalování) motoru, se opakovaně vstříkne asi sto litrů vody, čímž se motor vyčistí. Tento postup snižuje spotřebu paliva a může být proveden, aniž by letadlo bylo odstaveno mimo provoz. [14]

### 3.3.2 Off - wing opravy a generální opravy

Navzdory sebelepší on - wing údržbě musí být nakonec každý motor demontován z letadla a rozebrán za účelem kompletní údržby. Většina velkých aerolinií disponuje záložními motory, které okamžitě nahradí motor, který je demontován, což je v podstatě metoda dle bloků, jen tentokrát je blokem celý motor. Například výměna celého motoru General Electric NX, který pohání například Boeing 787, zabere čtyřem mechanikům okolo čtyř hodin. V posledních letech se ale začal uplatňovat nový trend. Náhradní motory si aerolinie pronajímají, a to většinou od výrobce motoru. To šetří náklady na pořízení náhradního motoru, který by stejně většinu času nebyl používán.[15]

V dnešní době se objevují tři základní způsoby, jak provést opravu motoru. První způsob je, že aerolinie či jiná společnost si opravy provádí sama ve vlastních dílnách. Ty zpravidla bývají umístěny na mateřských letištích. Jako příklad poslouží Delta Airlines se svým opravářským hangárem na letišti v Atlantě. Při druhém způsobu se o motor a jeho opravy stará firma, která jej vyrobila. To je sice nákladné, ale zajišťuje to vysokou profesionalitu odvedené práce. Třetí způsob je ten, že se o motory stará externí firma. Takto je to zařízeno například u motorů vlastněných armádou ČR.



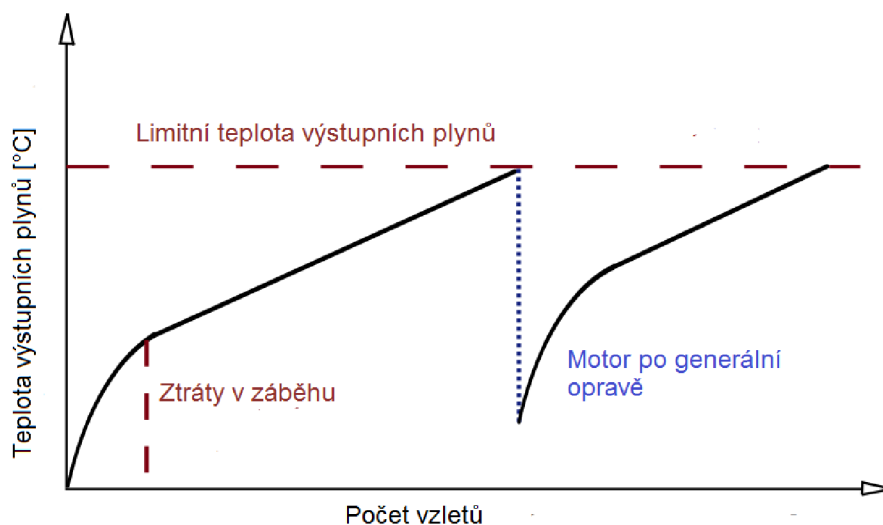
Obr. 13: Svěšení motoru General Electric GE 90 [17]

### 3.4 Hlavní důvody demontování motoru

Jak již bylo výše uvedeno, stav moderního motoru letadla je neustále monitorován. To umožňuje předvídat, kdy opotřebení motoru dosáhlo takové meze, že je potřeba jej demontovat a provést generální opravu. Obecně vzato je tedy generální oprava plánovaná záležitostí a opakuje se v předvídatelných intervalech. V případě, že dojde k nestandardní situaci a část motoru selže či je poškozena a nelze ji opravit s motorem na křídle, musí být motor sejmut a odeslán na opravu dříve. Důvody demontování motoru lze zařadit do čtyř základních kategorií: zvýšení teploty výstupních plynů, konec životnosti částí s pevně danou životností, opotřebení jednotlivých částí a jiné neplánované důvody.[16]

#### 3.4.1 Zvýšená teplota výstupních plynů

Nejčastějším důvodem ke generální opravě bývá zvýšená teplota výstupních plynů. Znamená to, že On - wing údržba byla prováděna správně, že vše co šlo, bylo opraveno či vyměněno bez demontování motoru a že se motor přibližuje ke hranici své životnosti. Zvýšená teplota je způsobena postupným opotřebením kompresoru a lopatek turbíny. To vede ke zvýšení vzdálenosti mezi konci lopatek a okolním prstencem, což snižuje celkový výkon a efektivitu motoru. Takto opotřebený motor tedy musí spálit více paliva, aby dosáhl stejného tahu jako nový motor. Pokud by se opotřebení dále zvyšovalo a teplota dále rostla, hrozilo by fatální poškození turbíny.[14]



Graf 5: Graf zobrazuje závislost teploty výstupních plynů na počtu vzletů, a změnu teploty výstupních plynů u motoru po generální opravě. [7]

Poté, co je na motoru provedena generální oprava, se teplota výstupních plynů opět snižuje, nikdy však nedosáhne hodnot jako nový motor.

### 3.4.2 Konec životnosti částí s pevně danou životností

Jedná se o komponenty motoru, jako jsou rotační nebo hlavní statické části motoru, jejichž selhání by mohlo způsobit například zastavení motoru či požár. Pro každou takovou část je stanovena životnost, kterou by pak neměla překročit, a ta je dána například maximálním počtem vzletů. Po přiblížení se k limitnímu počtu cyklů je nutné součást vyměnit. Části s pevně danou životností a jejich výměna tvoří největší položku v celkové ceně údržby leteckých turbínových motorů. [5]

### 3.4.3 Opotřebení jednotlivých částí

Každá část leteckého motoru je vystavena jinému mechanismu opotřebení. Může jít o nízko- či vysokocyklovou únavu, termomechanickou únavu či korozi, což může vést ke ztrátě výkonu nebo až k selhání některého komponentu. Na rozdíl od částí s pevně danou životností, jsou zbylé komponenty vyměňovány na základě výše zmíněné metody on - condition. U moderních motorů se tedy spoléhá, že systém monitorování stavu motoru včas identifikuje závady na těchto součástech. Pokud takovýto díl nelze vyměnit s motorem na křídle, je nutné motor demontovat a odvézt do dílny. Opotřebení jednotlivých částí závisí také na tom, v jakých podmínkách se motor používá. Například u letounů létajících často v přímořských oblastech se počítá, že slané prostředí urychlí korozi. Motory letadel pohybujících se v prašném prostředí, jako jsou pouště či okolí sopek, jsou degradovány abrazí.

### 3.4.4 Jiné neplánované důvody

Poslední skupina zahrnuje případy poničení motoru cizím objektem, selhání některého ze systémů motoru či vibrace. Snahou výrobců motorů je minimalizovat takovéto případy. Typickým případem takovéto snahy, je ochrana motoru před nasátím ptáka. Prvním ochranným prvkem je spirála namalovaná na krytu uprostřed dmyhadla, ze které má ptáctvo strach. Nové generace motorů typu turbofan mají navíc lopatky dmyhadla uspořádány tak, aby více než 80% částic nasátých dmyhadlem bylo nasměrováno mimo střed motoru, a tedy aby obtekly jádro motoru.

## 3.5 Management údržby

Komerční aerolinie vynakládají veliké úsilí k přesnému a efektivnímu plánování nasazení své flotily, musí vzít v potaz poptávku po letech, typ a velikost letadla, jak často a mezi kterými destinacemi se bude létat, apod. K tomu se navíc musí počítat s údržbou a opravami letadel. I když by určité letadlo mohlo létat z jedné destinace do druhé a zase zpět, musí dispečeři plánovat jeho zastávky na letištích vybavených potřebnou technikou pro provedení potřebné údržby. [16]

Check	Přibližná frekvence	Doba trvání
Předletová	Před každým odletem	40-60min
Turnaround	3-5 dní	Přes noc
A check	2000 letových hodin nebo 4 měsíce	Přes noc
C check	6200 letových hodin nebo 12 měsíců	3-5 dní
D check	30000 letových hodin nebo 72 měsíců	Měsíc

*Tab. 2: Příklad provádění údržby letadla. Pojem "přes noc" (angl. Overnight) je vyjádřením toho, že prohlídka je prováděna v plánované odstavce letounu z provozu. [7]*

Výše uvedená tabulka ukazuje, v přibližně jakých teoretických intervalech a na jak dlouho je potřeba letadlo odstavit. Každé letadlo má vlastní plán schválené údržby, v něm jsou rozpisy časů a předepsaných prací pro veškeré agregáty letounu a části jeho konstrukce.

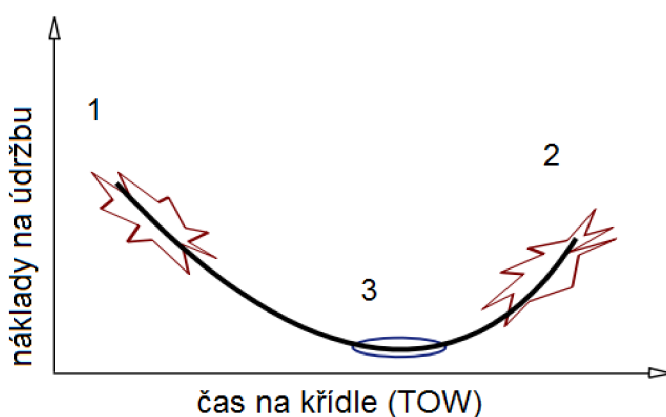
Různá letadla mají intervaly mezi jednotlivými prohlídkami jiné, ale každé z nich musí manager údržby směřovat tak, aby v okamžiku, kdy je potřeba provést určitý údržbářský úkon, bylo letadlo na letišti s odpovídající výbavou, a to nejlépe tak, aby do této destinace přiletělo i odletělo s cestujícími či nákladem, a tím aby se eliminovaly lety prázdných letadel.

Příkladem by mohla být rodina nejpoužívanějších proudových leteckých motorů světa CFM 56. Tyto motory pohánějí například Boeingy 737, Airbusey A318, A319, A320, A340, Douglas DC-8 a další. Na vývoji a výrobě se podílí firmy General Electric

a Snecma. Tyto firmy mají své opravárenské podniky strategicky rozmístěny po celém světě. Generální opravy těchto motorů společností General Electric jsou v Evropě prováděny v Cardiff, Wales, UK. Generální opravy jsou dále prováděny u smluvních partnerů v Madridu, Curychu, Bruselu, Amsterdamu a ve Francii v Saint-Quentin. K motorům rodiny CFM 56 výrobce dodává nepřetržitou pomoc zákazníkům z podpůrného centra v Montreaux, Francie. On-wing opravy a údržbu pak provádí na letišti Heathrow v Londýně, ale dle potřeby zákazníka je možno provádět on-wing údržbu v místě určeném zákazníkem. Při zakoupení letadla si aerolinie zároveň vybírají, jaká firma bude údržbu provádět, na jakých místech budou probíhat jednotlivé prohlídky a jakým způsobem bude vyřešena finanční stránka. [21]

V dřívějších dobách si mnoho aerolinií provádělo opravy svých motorů ve vlastních dílnách. V dnešní době však k tomu většina aerolinií využívá smluv s externími firmami (výrobce motoru či třetí firma). V současné době se při tvorbě smluv využívá tři základních principů. První se nazývá *Time and Material Contract* (Smlouva na čas a materiál), kdy firma zajišťující provedení opravy dodá pro každý motor přesný rozpis ceny materiálu a práce. Zákazník tuto částku zaplatí výměnou za to, že opravárenský podnik poskytne záruku na minimální čas na křídle. Tímto způsobem mají smlouvy ošetřené i v Leteckých opravách Malešice. Oproti tomu smlouva *Fly-By-Hour* (dle letových hodin), zavazuje aerolinie platit opravárenskému podniku pevný finanční obnos za každou letovou hodinu. Firma starající se o údržbu motorů tedy musí veškeré údržbářské úkony platit z těchto předem inkasovaných peněz. Tento způsob umožňuje aeroliniím předvídat cenu údržby motorů. Třetí typ smluv se nazývá *Fixed Price* (pevná cena) a spočívá v tom, že aerolinie platí pevnou sumu za určitý typ údržby. Cena je tedy odlišná, pokud jde o generální opravu či o opravu pouze některého z modulů. Aerolinie se obvykle snaží využívat různých kombinací těchto smluv, aby dosáhly co nejnižší ceny a aby cena údržby byla předvídatelná. [15]

Jedním z hlavních cílů při plánování údržby je dosáhnout ideálního času motoru na křídle (TOW).



Graf 6: Závislost nákladů údržby na čas na křídle [7]

Ideální čas motoru na křídle je v Grafu 2 označen číslem 3, pokud je čas na křídle menší (oblast 1), vzrůstají náklady na údržbu z důvodu nízkého používání motoru

– to je důvod, proč moderním trendem leteckých společností je nekupovat náhradní motory, které by většinu času byly uloženy v hangáru, ale raději si je pronajímat. Oblast 2 označuje opět zvýšené náklady na údržbu leteckého proudového motoru, tentokrát však z důvodu přílišného využívání motoru, cena oprav pak neúměrně stoupá.

Management údržby leteckých motorů je velmi složitý proces, který začíná již navrhováním motoru. Konstrukteři moderních motorů se pokoušejí o to, aby ideální TOW motoru byl co největší. Jedním ze způsobů je konstruování a výroba motoru, jehož jednotlivé kritické části budou mít velice podobnou životnost, tedy že při svěšení motoru a návštěvě dílny se ve stejnou dobu vymění či opraví co největší počet částí.

Managerům leteckých společností usnadňuje práci výpočetní technika, která ze vstupních údajů optimalizuje trasy i jednotlivé zastávky letadel, tak aby bylo docíleno co nejefektivnějšího využití techniky a dosažení ideálního TOW.

## 4. Praktický průběh oprav v podniku Letecké opravny Malešice (LOM)

### 4.1 Převzetí do opravy

Tento prakticky jediný opravárenský podnik v ČR se specializuje zejména na údržbu leteckých motorů Ivčenko AI-25, používaných v českých podzvukových stíhacích letounech Aero L-39, provozovaných nejenom armádami, ale i soukromníky po celém světě.

Provozovatelé těchto letounů si běžnou údržbu většinou provádějí sami, případně k tomu využívají externích firem, pokud však dojde k nějaké závadě, případně skončí životnost některé ze součástí, vyráží k letadlu servisní tým z LOM, který rozhodne o svěšení motoru a postará se o jeho přepravu do areálu LOM. Tam je již připraven přesný postup oprav.

Prvním místem, kde se motor zastaví, je úsek převzetí do opravy, který se dále dělí na dvě části. V první se kontroluje dokumentace motoru, zda všechna výrobní čísla odpovídají, jestli byly doloženy všechny zprávy o opravách apod. Druhá část se zaměřuje na fyzickou kontrolu motoru. Zejména se pak kontrolují zapečetění důležitých částí, které bylo provedeno při poslední návštěvě opravny, a kompletnost motoru. Pokud je vše tak jak má, vydá tento úsek povolení k opravě, což je de facto objednávka uvnitř firmy na provedení opravy.

### 4.2 Demontáž a čištění

Druhou zastávkou motoru jsou již dílny, kde se nejprve provede demontáž do skupin jako je kompresorová část, spalovací komora, turbínová část apod. Jednotlivé

skupiny jsou pak odváženy na specializovaná pracoviště, kde jsou kompletně rozebrány. Každé součásti motoru je přiřazena tzv. průvodka, což je listina, na které jsou napsány jednotlivé úkony, které musí být s danou součástí provedeny, kdo a kde je má provést. V LOM se stále používají průvody papírové, které ač jsou v průhledné folii, jsou často umaštěné a často se ztrácí. Technik, který daný úkon na součásti provedl, se na průvodku podepíše, čímž přebírá odpovědnost. V moderních leteckých opravách se průvodky vedou v elektronické podobě a zaměstnanci se nepodepisují, ale místo toho používají čipy.

Prvním úkonem, který je prováděn u naprosté většiny součástí, je mytí. Podle typu součásti se používají různé roztoky, které mají různé vlastnosti. Nejdůležitější je zbavit se zbytků starých nátěrů, rzi či napečenin v horkých částech motoru, a součásti odmastit.



*Obr. 14: Bedny s lopatkami turbíny, před čištěním. Jedna bedna lopatek má hodnotu něco kolem milionu českých korun.*

### 4.3 Kontrolně technologický nález

Již čisté součásti pak putují do úseku kontrolně technologického nálezu, kde se jednotlivé součásti kontrolují předem danými postupy. Tento úsek by se dal jednoduše



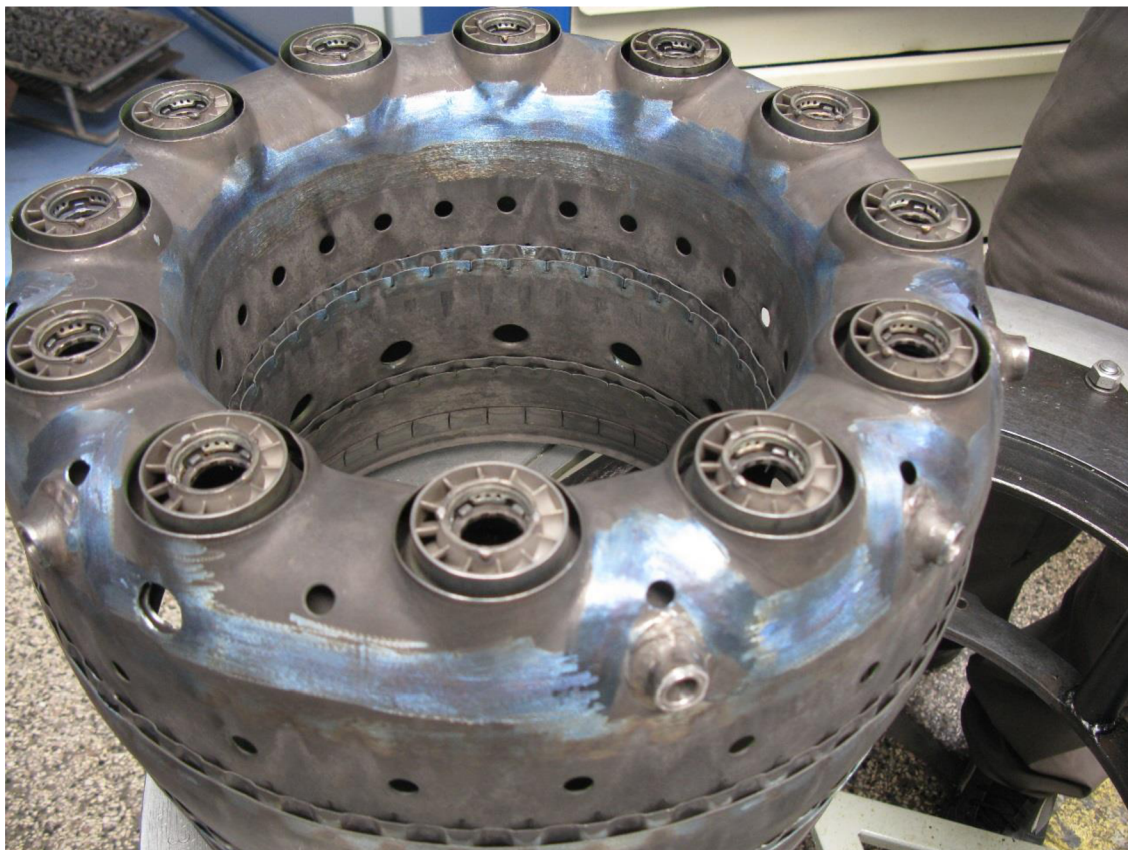
rozdělit do tří částí. V první probíhá vizuální kontrola. Zkoumá se drsnost povrchu, viditelná poškození, díl se porovnává se vzorovou součástí. V druhé části se díl proměřuje. Zkoumá se, zda vyhovuje tolerancím, jestli nedošlo k plastické deformaci, či naopak ke změně rozměrů součásti vlivem abrazivních procesů. Vyhovující součásti jsou odeslány na další pracoviště, u nevyhovujících se rozhoduje, zda je možné je opravit.

Další důležitou zastávkou vybraných součástí je úsek defektoskopie. Tam jsou odesílány součásti, které jsou náchylné ke vzniku únavových trhlin nebo jiných druhů poškození. V LOM se v úseku defektoskopie využívají dvě metody. První, kapilární luminiscentní metoda, využívá toho, že luminiscentní kapalina zaběhne do i těch nejmenších otvorů, a následně je vytažena pomocí křídly na povrch součásti. Tato metoda odhaluje pouze povrchové vady, ale dobře konturuje únavové trhliny. Druhá, magnetická prášková metoda, již dokáže odhalit i některé podpovrchové vady, a její podstata spočívá v tom, že se na zmagnetizovanou součást nalepí kovový prach a uspořádá se do tvaru siločar. Změny v průběhu siločar pak ukazují na defekt. Po skončení zkoumání součásti touto metodou je potřeba danou součást vždy velmi důkladně odmagnetizovat a očistit, a to hned ze dvou důvodů. Mohla by například nastat situace, kdy se ke zmagnetizované lopatce kompresoru vlivem magnetických sil bude přichytávat drobný feromagnetický prach, který může svými abrazivními účinky turbínu zničit. Druhým důvodem je, že rotací zmagnetizované součásti v magnetickém poli jiné součásti, se může indukovat elektrický proud, což v extrémním případě může vést k vytvoření svaru. V motoru je také veliké množství součástí, u kterých se očekává velice podobný způsob a rozsah opotřebení. Typicky se jedná o lopatky turbíny. Při generální opravě se proto z každého stupně turbíny náhodně vybere jedna lopatka, která se rozřízne a provede se na ní metalografický výbrus. Pokud se zjistí, že došlo například k tepelnému ovlivnění vrstvy hlubší, než dovoluje výrobce, musí se vyřadit všechny lopatky na daném stupni. Jen pro představu, nová sada lopatek pro jeden stupeň turbíny motoru AI-25 stojí asi jeden milion českých korun.



*Obr. 15: Poslední stupeň turbíny (vyrobený přesným odléváním) před odesláním na mytí. V levém dolním rohu jsou lopatky turbíny se stromečkovým zámekem, který zaručuje jejich přesné ustavení.*

V tomto úseku se také rozhoduje, zda je součást v pořádku nebo je poškozená. V případě poškození se rozhoduje, jestli je možné ji opravit či nikoli. Moderním trendem je co nejvíce součástí opravit a vrátit je zpět do provozu. Stále častěji se používají i díly tzv. druhé kategorie tj. díly z jiného, již vyřazeného motoru, které však splní dané podmínky. Každá součást leteckého motoru má svůj technický list, ve kterém výrobce stanovuje, jakou závadu je možné jakým způsobem opravit, co je důvodem k vyřazení součásti a jaká je její technická životnost, kterou když přesáhne, musí být bezpodmínečně vyřazena (koncept údržby hard - time). Pokud se vyskytne poškození součásti, které by dle technického listu způsobilo její vyřazení, ale na funkčnost dané součásti nemá vliv - typicky se jedná o drobné poškození nějaké plochy, která není funkční, předává se celá záležitost konstrukčnímu oddělení firmy. Konstrukteři pak navrhnu způsob opravy, vše důkladně zdokumentují a odešlou na konzultaci konstruktérům výrobce motoru, kteří musí daný postup schválit.

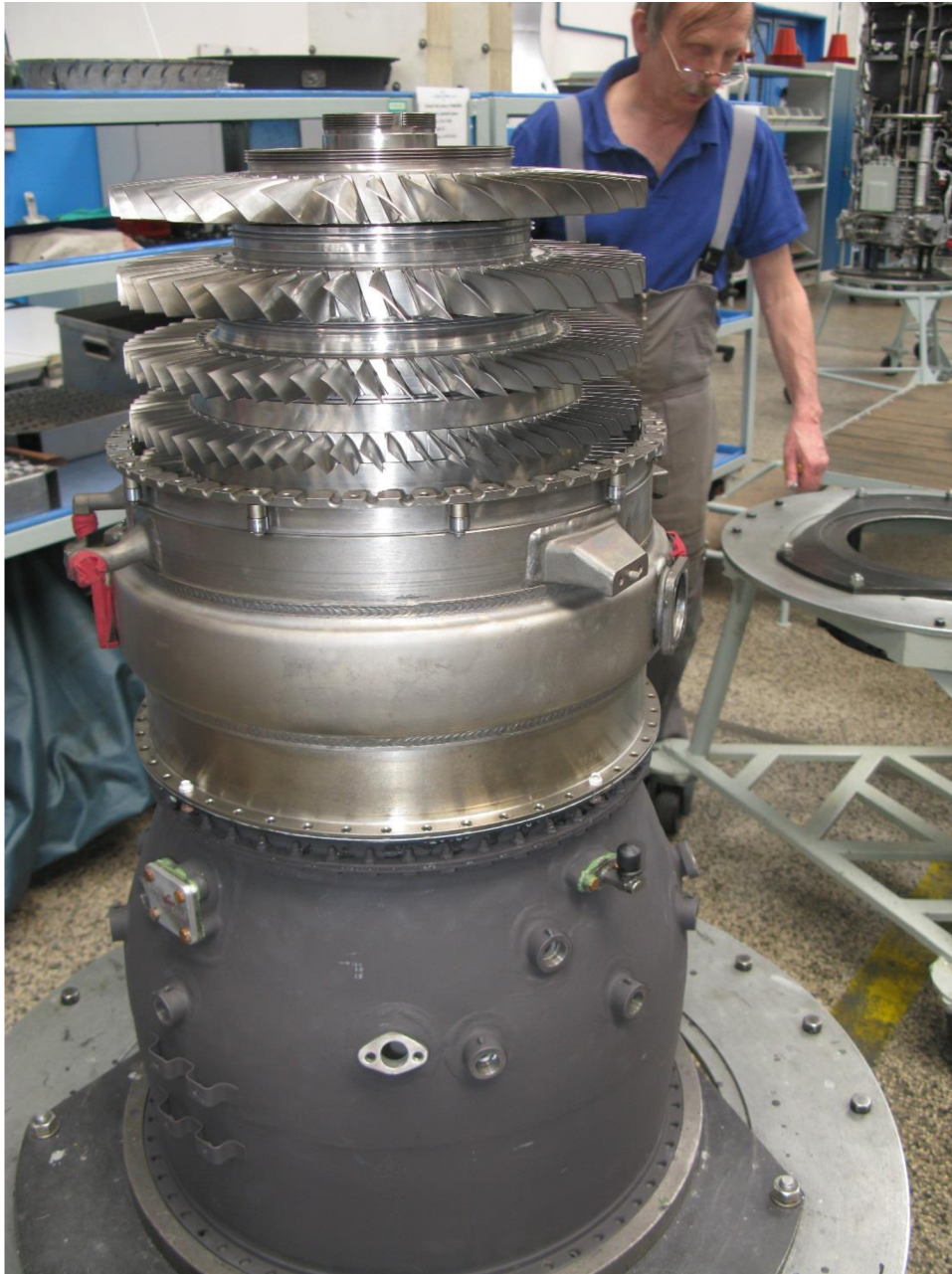


*Obr. 16: Fotografie plamence, lesklé části jsou místa, kde byl plamenec rozřiznut, za účelem výměny vířivých turbín, a následně svařen*

Specialitou LOM je úsek ložisek. Jedná se o jediný podnik v Evropě, kde se opravují a repasují ložiska do leteckých motorů. Každé ložisko, které se sem dostane, je nejdříve omyto a následně podrobena triviální zkoušce- protočení v rukou, které má za úkol zjistit, zda má ložisko hladký chod, jestli je nějaký defekt v dráze, či jestli je nějaký váleček či kulička vadná. Poté je ložisko rozebráno, znovu vyčištěno, a důkladně přeměřeno. Pokud je vše v pořádku, znovu se složí dohromady, naolejuje a zabalí do voskovaného papíru. V případě defektu se opět na základě technického listu rozhoduje o opravě, či o vyřazení.

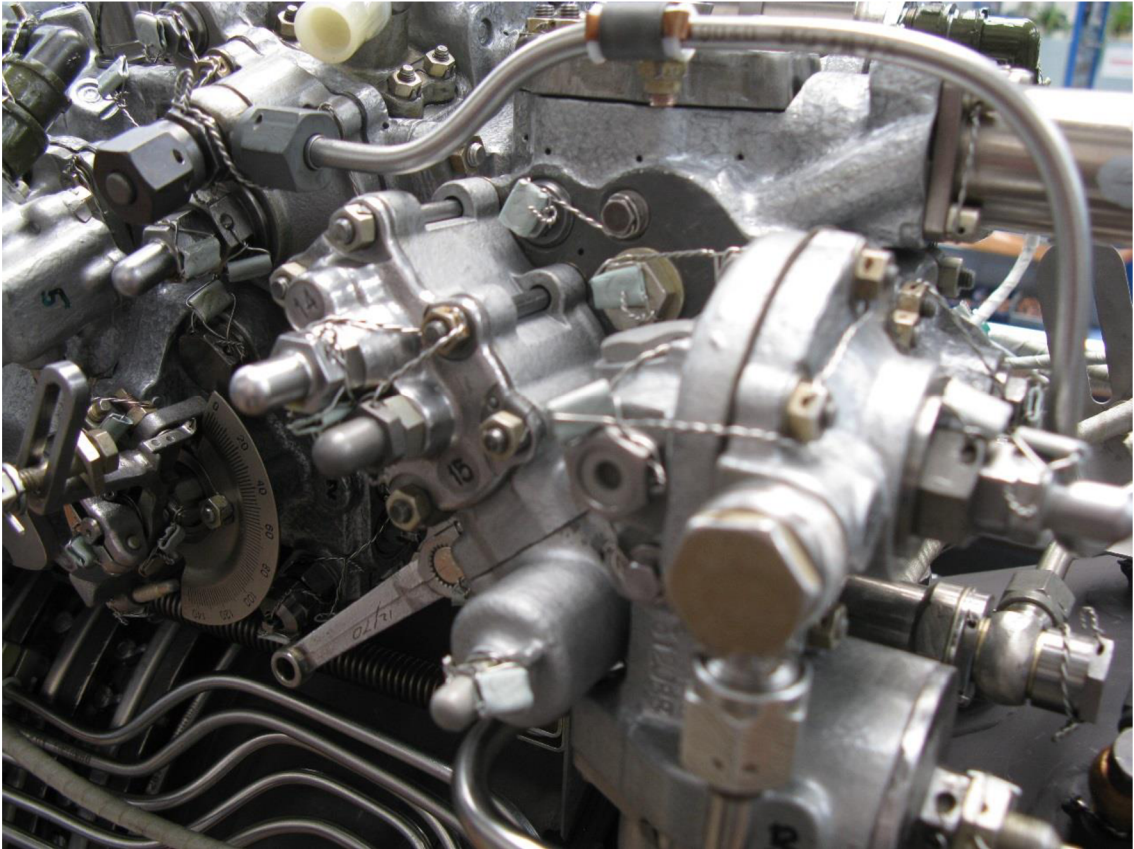
#### 4.4 Montáž

Vyměněné, opravené či jen zkontrolované díly se pak postupně scházejí v úsecích, kde je montují do jednotlivých skupin, tak jak tomu bylo při demontáži. Zde se také před tím, než je součást namontována do sestavy, kontrolují již zmíněné průvodky jednotlivých dílů. Kontroluje se, zda byly opravdu provedeny všechny předepsané úkony a zda dokumentace odpovídá skutečnosti. Případné nesrovnalosti se řeší ještě před tím, než je součást zamontována do skupiny. Každá skupina pak po smontování prochází sérií kontrol, prověřují se maximální povolené vůle, např. na každém stupni kompresoru se označí nejdelší lopatka a ta pak slouží k určení minimální vůle.



*Obr. 17: Montáž kompresorové části motoru*

Jednotlivé skupiny se pak setkávají v úseku konečné montáže, kde se dohromady sestaví, pak se připojí další díly, jako jsou palivová vedení, senzory atd., a vše se důkladně zaplombuje. Zaplombování slouží jak opravárenskému podniku, tak i provozovateli, provozovatel si tedy nesmí některé součásti vůbec rozmontovat a opravovatel tím dává záruku za danou součást.



*Obr. 18: Již zaplombované ústrojí palivových rozvodů*

Poslední zastávkou motoru je pak zkušebna, kde se provedou rozsáhlé testy motoru, seřídí se, ještě naposledy se zkontroluje dokumentace, vše se zkompletuje, motor se zakonzervuje, zabalí a je připraven k expedici.

I když se podnik Letecké opravy Malešice zaměřuje na opravy vojenské techniky a koncept údržby hard – time se projevuje na pracovních postupech, nemění se nic na faktu, že takřka stejným způsobem probíhají generální opravy motorů sloužících v dopravních letadlech. Celkově se zde údržba motorů provádí na velmi profesionální úrovni s využitím moderních technologických postupů. Jeden z technologických procesů, který tento podnik postrádá, je technologie svařování plasmou, která se používá v jiných leteckých opravárnách. Při tomto typu svařování dochází k tepelnému ovlivnění pouze malé oblasti.



*Obr. 19: Maketa motoru TV3, jednoho z nejrozšířenějších turbohřídelových motorů na světě, který se nachází například na vrtulnicích Mi-17 či Mi-24, podle které montéři sestavují motory a kontrolují, zda je vše na správném místě.*

Důkazem vysoké kvality práce může být i to, že motory si zde nechává opravovat i slavná francouzská akrobatická skupina Breitling. (Při mé návštěvě tohoto podniku se však šéfkonstruktér firmy, který se o mě staral, dověděl, že u jednoho z motorů skupiny Breitling, který nedávno prošel generální opravou, byl nalezen po 56 letových hodinách v olejových filtrech bronzový prach - což by ukazovalo na problém v některém z ložisek. Musel tedy odejít řešit vzniklou situaci a předal mě do péče šéfa kontrolně technologického nálezu.)

## 5. Závěr

Letecký turbínový motor je složitý stroj, jehož spolehlivý chod vyžaduje provádění údržby. Jedná se o složitou činnost, jejíž rozsah si člověk uvědomí až při návštěvě některého z opravárenských podniků. Význam údržby leteckých lopatkových motorů bude v budoucnu stále vyšší, a to zejména díky tlaku veřejnosti na další zvýšení bezpečnosti letecké dopravy a rostoucímu konkurenčnímu boji. Z prostudovaných materiálů, vyplývá, že moderní trendy v údržbě leteckých motorů se jednak zaměřují na stále rozsáhlejší aplikaci moderních diagnostických senzorů v motoru, které v reálném čase umožňují lepší sledování stavu pohonné jednotky. Druhým trendem je důraz na management údržby, se snahou o optimalizaci nákladů. Z toho důvodu bude tradiční metoda (hard - time) v civilním letectví pro svou nákladnost dále nahrazována modernější metodou on - condition. Tradiční metoda však bude mít vždy v letectví své místo, už z důvodu zajištění potřebné úrovně bezpečnosti u kritických komponentů, jejichž stav je obtížné monitorovat, jako je např. spalovací komora. Snahou však je zajistit co nejdokonalejší monitorování stavu motoru v reálném čase.

Konstruktéři moderních leteckých lopatkových motorů budou klást stále větší důraz na modulární konstrukce pohonných jednotek tak, aby se v případě poruchy některé z částí rychle vyměnil pouze modul, ve kterém se poškozená součást nachází, aniž by se motor musel sejmut z křídla. Počet dílů s pevně stanovenou životností se bude v nově vyvíjeních motorech, jako je LEAP-X, dále snižovat, a to zejména díky aplikaci výkonných výpočetních 3D simulací proudění, které pomáhají zlepšovat vnitřní aerodynamiku motoru., což povede ke snížení nákladů na údržbu. Díky novým technologiím oprav dílů (plazmové navařování materiálu, svařování elektronovým paprskem, plazmové nástřiky), dále poroste počet opravených dílů, které by bez těchto technologických postupů musely být vyměněny, což opět povede ke snižování ceny údržby.

## 6. Seznam použité literatury

- [1] *He-178, Fiddlers Green* [online]. [cit. 15.5.2013]. Dostupný na: <http://www.fiddlersgreen.net/models/aircraft/Heinkel-178.html>
- [2] GROVES, C. *Wikimedia Commons* [online]. [cit. 15.5.2013]. Dostupný na: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aeromaritime\\_de\\_Havilland\\_Comet\\_1\\_Groves.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aeromaritime_de_Havilland_Comet_1_Groves.jpg)
- [3] DAHL, J. *Wikimedia Commons* [online]. [cit. 15.5.2013]. Dostupný na: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Jet\\_engine.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Jet_engine.svg)
- [4] AAINSQATSI, K. *Wikimedia Commons* [online]. [cit. 15.5.2013]. Dostupný na: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e3/Turbojet\\_operation-\\_axial\\_flow.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e3/Turbojet_operation-_axial_flow.png)
- [5] KUSSIOR, Z. *Typy leteckých motorů*. [online]. Letecké motory, 2007. [cit. 6-5-2013]. Dostupné z: <http://www.leteckemotory.cz/teorie/teorie-02.php>
- [6] SIAHG, A. *Turboprop engine* [online]. [cit. 15.5.2013]. Dostupný na: <http://arvindsihag.blogspot.cz/2012/05/v-behaviorurldefaultvml.html>
- [7] SEEMANN, R. *Modeling the Life Cycle Cost of Jet Engine Maintenance*. [online]. Hamburg: Technische Universität Hamburg-Harburg, 2010. 80 s. Dostupné z: <http://aerodenprop.files.wordpress.com/2012/09/42773201-modeling-the-life-cycle-cost-of-jet-engine-maintenance.pdf>
- [8] SULLIVAN, B. *Qantas Flight 32: Uncontained engine failure and damage to the aircraft* [online]. [cit. 15.5.2013]. Dostupný na: <http://aircrewbuzz.blogspot.cz/2010/12/qantas-flight-32-uncontained-engine.html>
- [9] HURT, N. *On wing maintenance* [online]. [cit. 14.5.2013]. Dostupný na: [http://aviationtech.org/yahoo\\_site\\_admin/assets/images/on\\_wing\\_repair.35154709\\_std.jpg](http://aviationtech.org/yahoo_site_admin/assets/images/on_wing_repair.35154709_std.jpg)
- [10] *Me 262, WW2 German Airplanes and Aces* [online]. [cit. 15.5.2013]. Dostupný na: [http://acepilots.com/german/me262\\_1.jpg](http://acepilots.com/german/me262_1.jpg)
- [11] ROLLS-ROYCE. *Condition Monitoring* [online]. [cit. 8.5.2013]. Dostupný na: [http://www.rolls-royce.com/Images/controlSystems\\_tcm92-30272.jpg](http://www.rolls-royce.com/Images/controlSystems_tcm92-30272.jpg)
- [12] CHASE, J. *Off wing maintenance* [online]. [cit. 21.5.2013]. Dostupný na: [http://www.dansforklifts.com/sites/dansforklifts.com/files/styles/large/public/machinery\\_images/ge90\\_engine\\_ac737\\_016.jpg?itok=HDYoeCy2](http://www.dansforklifts.com/sites/dansforklifts.com/files/styles/large/public/machinery_images/ge90_engine_ac737_016.jpg?itok=HDYoeCy2)
- [13] MOORES, V. *EasyJet reveals eco-friendly aircraft concept* [online]. [cit. 21.5.2013]. Dostupný na: <http://www.flightglobal.com/news/articles/easyjet-reveals-eco-friendly-aircraft-concept-214641/>
- [14] AVRAT, J. *Metody údržby a diagnostiky lopatkových motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D.
- [15] ACKERT, S. *Engine Maintenance Concepts for Financiers*. [online]. 2.vydání. 2011. 42 s. Dostupné z: [http://www.aircraftmonitor.com/uploads/1/5/9/9/15993320/engine\\_mx\\_concepts\\_for\\_financiers\\_\\_v2.pdf](http://www.aircraftmonitor.com/uploads/1/5/9/9/15993320/engine_mx_concepts_for_financiers__v2.pdf)



- 
- [16] SEH CHOO, B. *Best practices in aircraft MRO*. [online]. Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics, 2004. 113s. Dostupné z: <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/17761/56525247.pdf?sequence=1>
- [17] *Transportation Fatalities in 2011, Data & Statistics*. [online]. National Transportation Safety Board, 2012. [cit. 25-04-2013]. Dostupné z: <http://www.nts.gov/data/>
- [18] FIALA, L. *Vývojové trendy leteckých lopatkových motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 30 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Šplíchal.
- [19] DONALD, D. *Encyklopedie letadel světa*. Praha: Cesty, 1997. 929 s.
- [20] KOCÁB, Jindřich a Josef ADAMEC. *Letadlové motory*. 1. vyd. Praha: Kant, 2000, 176 s. ISBN 80-902914-0-6.
- [21] GE AVIATION. *On wing support* [online]. [cit. 21.5.2013]. Dostupný na: <http://www.geaviation.com/services/maintenance/on-wing-support.html>
- [22] ADAMS, C. *Understanding MSG-3* [online]. [cit. 21.5.2013]. Dostupný na WWW: [http://www.aviationtoday.com/am/repairstations/Understanding-MSG-3\\_33062.html#.UZuVP6KeMbg](http://www.aviationtoday.com/am/repairstations/Understanding-MSG-3_33062.html#.UZuVP6KeMbg)