

Utvrđivanje tehničkog stanja mlaznog motora praćenjem radnih parametara

Prlenda, Matej

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:540430>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

DIPLOMSKI RAD

**UTVRĐIVANJE TEHNIČKOG STANJA MLAZNOG
MOTORA PRAĆENJEM RADNIH PARAMETARA
ENGINE CONDITION TREND MONITORING**

Mentor: prof. dr. sc. Ernest Bazijanac

Student: Matej Prlenda, 0135242020

Zagreb, kolovoz 2022.

Zagreb, 3. lipnja 2022.

Zavod: **Zavod za zračni promet**
Predmet: **Eksploatacija i održavanje zrakoplova**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 6990

Pristupnik: **Matej Prlenda (0135242020)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Zračni promet**

Zadatak: **Utvrđivanje tehničkog stanja mlaznog motora praćenjem radnih parametara**

Opis zadatka:

U radu je potrebno u uvodnom dijelu opisati modele održavanja zrakoplovnih mlaznih motora.
Analizirati metode za utvrđivanje tehničkog stanja mlaznoga motora.
Razraditi algoritme za obradu podataka i postavljanja dijagnoze na temelju praćenja tehničkoga stanja, te na odabaranom primjeru i konkretnom slučaju provesti postupak obrade podataka i uspostavljanje dijagnoze tehničkoga stanja.

Zadatak uručen pristupniku: 3. lipnja 2022.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

prof. dr. sc. Ernest Bazijanac

Sažetak

Održavanje zrakoplova provodi se u skladu sa međunarodnim i nacionalnim normama i propisima i osnovni je preduvjet sigurnosti u zračnom prometu. U ovom radu fokus je stavljen na održavanje mlaznih motora zrakoplova s primjerom CFM56-5B motora. Objasnjeno je MSG koncept kojem je cilj prepoznati pouzdanost sustava i komponenti zrakoplova, izbjeći nepotrebne zadatke održavanja te na taj način postići veću učinkovitost održavanja. Dan je pregled sustava koji omogućavaju praćenje tehničkog stanja motora kao što su sustavi BITE i FADEC. Istraženo je koji se radni parametri mlaznih motora prate i objašnjeno kako se na temelju prikupljenih podataka procjenjuje stanje motora (ECTM). Dan je pregled vrsta troškova koji nastaju održavanjem motora i analiziran utjecaj ECTM-a na sigurnost i ekonomičnost eksploatacije.

Ključne riječi: MSG koncept; BITE; FADEC; ECTM; EGT; Mlazni motori

Summary

Aircraft maintenance is performed in line with international and national regulations and it is an essential prerequisite of air traffic safety. In this thesis, the focus is given to maintenance of aircraft jet engines with example of CFM56-5B engine. MSG concept whose objective is to recognize the reliability of the system and aircraft components, avoid any unnecessary maintenance tasks and accomplish a high level of maintenance effectiveness is explained. An overview of the systems that enable monitoring of engine's condition, such as BITE and FADEC is also given. Trend monitoring of the working parameters of engines was researched and it is explained how the engine condition is evaluated based on the collected data. An overview of types of expenses that are related to engine maintenance is given and the effect of ECTM to safety and financial effect of exploitation is analyzed.

Key words: MSG concept; BITE; FADEC; ECTM; EGT; Jet Engines

Sadržaj

| | |
|---|----|
| Sažetak | |
| 1. Uvod..... | 1 |
| 2. Organizacije i propisi za održavanje zrakoplova | 3 |
| 3. Model održavanja zrakoplova i motora temeljem MSG koncepta | 6 |
| 3.1. MSG koncept održavanja..... | 7 |
| 3.2. Izrada početnog programa održavanja | 10 |
| 4. Mlazni motori zrakoplova | 12 |
| 4.1. Podjela mlaznih motora | 12 |
| 4.2. Konstrukcija turboventilatorskog CFM56 motora | 15 |
| 5. Utvrđivanje tehničkog stanja motora | 19 |
| 6. Sustav BITE | 20 |
| 6.1. Razvoj BITE sustava..... | 20 |
| 6.2. Načelo rada sustava BITE | 21 |
| 7. Sustav za kontrolu rada motora FADEC | 24 |
| 8. Praćenje trenda radnih parametara | 31 |
| 9. Procjena performansi i analiza tehničkog stanja motora | 34 |
| 9.1. Način utvrđivanja degradacije parametara | 34 |
| 9.2. Promjena EGT | 36 |
| 10. Utjecaj praćenja trenda radnih parametara na sigurnost i ekonomičnost eksploatacije | 47 |
| 11. Zaključak | 51 |
| Literatura | 52 |
| Popis kratica..... | 57 |
| Popis slika | 59 |
| Popis tablica | 60 |

1. Uvod

Održavanje zrakoplova podrazumijeva aktivnosti potrebne za obnovu i/ili očuvanje zrakoplovnih sustava i komponenti u plovidbenom stanju. Osnovni je preduvjet sigurnosti zračnog prometa. U ovom su radu opisani modeli održavanja zrakoplovnih mlaznih motora. Analizirane su metode za utvrđivanje tehničkog stanja mlaznog motora.

Cilj rada je predstaviti načine obrade podataka prikupljenih tijekom utvrđivanja tehničkog stanja motora i uspostavljanja dijagnoze tehničkog stanja na temelju obrađenih podataka.

Rad je podijeljen u 11 cjelina:

1. Uvod
2. Organizacije i propisi za održavanje zrakoplova
3. Model održavanja zrakoplova i motora temeljem MSG koncepta
4. Mlazni motori zrakoplova
5. Utvrđivanje tehničkog stanja motora
6. Sustav BITE
7. Sustav za kontrolu rada motora FADEC
8. Praćenje trenda radnih parametara
9. Procjena performansi i analiza stanja motora
10. Utjecaj praćenja trenda radnih parametara na sigurnost i ekonomičnost eksploatacije
11. Zaključak

Nakon uvoda, u drugom poglavlju opisani su glavni propisi za održavanje zrakoplova te organizacije za održavanje i nadzor plovidbenosti zrakoplova.

U trećem poglavlju objašnjena je razlika između korektivnog i preventivnog održavanja te su opisani MSG modeli održavanja. Također je opisan postupak kreiranja početnog programa održavanja.

U sljedećem poglavlju dan je pregled vrsti mlaznih motora, s primjerom turboventilatorskog CFM56-5B motora i njegovih konstrukcijsko eksploatacijskih karakteristika, pojašnjene su osnovne zadaće komponenti te pokazatelji za ocjenu performansi motora.

U petom su poglavlju navedeni parametri rada motora koje je potrebno pratiti i sustavi koji to omogućuju.

U šestom je poglavlju objašnjen je BITE koncept, od kojih se jedinica sastoje BITE sustavi i na koji način funkcioniraju.

U sedmom poglavlju opisan je sustav FADEC, način njegova rada te glavne prednosti i nedostaci.

U osmom poglavlju objašnjena je važnost praćenja radnih parametara i njihovih trendova kretanja te su navedeni radni parametri koji se prate tijekom krstarenja te tijekom polijetanja zrakoplova.

Kroz deveto poglavlje na primjerima je prikazano kako se provodi procjena performansi zrakoplova te kako se analiziraju prikupljeni podaci.

U desetom poglavlju dan je pregled vrsta troškova koji mogu nastati u održavanju te je objašnjeno kako praćenje trenda radnih parametara utječe na sigurnost i ekonomičnost eksploatacije zrakoplova.

U posljednjem poglavlju, na temelju interpretiranih podataka, izveden je zaključak.

2. Organizacije i propisi za održavanje zrakoplova

Održavanje zrakoplova provodi se iz triju osnovnih razloga:

- Operativnosti – zrakoplov mora biti u odgovarajućem stanju kako bi se pomoću njega mogla stjecati dobit;
- Očuvanja vrijednosti – održavanje kojim se smanjuje propadanje zrakoplova tijekom vremena je nužno u očuvanju trenutane i buduće vrijednosti zrakoplova;
- Zakonskih propisa.

Održavanje zrakoplova provodi se po međunarodnim i nacionalnim normama i propisima. Održavanje se provodi nakon određenog broja sati leti ili nekoliko odrađenih letova, ili nakon utvrđenog stanja.

Organizacija međunarodnog civilnog zrakoplovstva (eng. *International Civil Aviation Organization* – ICAO) propisuje norme i propise vezano za održavanje zrakoplova koji se sastoje od 19 Aneksa. Aneks 6 odnosi se na operacije zrakoplova, a Aneks 8 se odnosi na kontinuiranu plovidbenost [1].

Agenciju Europske unije za sigurnost zračnog prometa (eng. *European Union Aviation Safety Agency* - EASA) osnovali su 2002. Europski parlament i Vijeće. Glavna je misija EASA-e osiguravanje visoke i jedinstvene razine sigurnosti i zaštite okoliša u civilnom zrakoplovstvu u Europi primjenom sigurnosnih pravila i mjera.

EASA je preuzela zadatke bivšeg Zajedničkog zrakoplovnog tijela (eng. *Joint Aviation Authorities* - JAA) koje je prestalo s radom 2009. godine. Glavna je razlika EASA-e i JAA u tome što je EASA regulatorna agencija koja preko nacionalnih agencija za zrakoplovstvo osigurava primjenu svojih propisa, dok se JAA oslanjala na nacionalne agencije u primjeni svojih preporuka bez zakonske obaveze primjene istih. EASA je preuzela velik dio sustava koji je razvijala JAA te na tim temeljima nastavila graditi novi harmonizirani sustav unutar EU.

Neke od nadležnosti EASA-e su certificiranje tipova zrakoplova i njegovih komponenti te izdavanje odobrenja poduzećima koja projektiraju, proizvode i održavaju aeronautičke proizvode [2].

EASA je izradila dva najznačajnija europska propisa koja reguliraju održavanje zrakoplova:

- EASA Part M: Kontinuirana plovidbenost (eng. *Continuing Airworthiness* - CA),
- EASA PART 145: Ovlaštena organizacija za održavanje (eng. *Approved Maintenance Organisation* - AMO) [3]

Navedeni propisi su dio Uredbe Komisije (EU) br. 1321/2014 od 26. studenoga 2014. o kontinuiranoj plovidbenosti zrakoplova i aeronautičkih proizvoda, dijelova i uređaja, te o odobravanju organizacija i osoblja uključenih u te poslove [4].

Part M propisuje zahtjeve za kontinuiranu plovidbenost zrakoplova i zrakoplovnih komponenti, dijelova ili uređaja te preduvjete za odobrenje organizacija i osoblja uključenih u zadatke održavanja zrakoplova. Zrakoplov se smatra plovidbenim ako tijekom leta nije bilo otkaza opreme i uređaja koji bi ugrozili sigurnost zrakoplova i putnika. U Part M propisane su procedure koje će osigurati stalnu plovidbenost te koje će nakon upotrebe zrakoplova osigurati njegovu daljnju eksploataciju. Dokument je podijeljen u sljedeća poglavlja:

- A. Općenito
- B. Odgovornost (definira uloge i odgovornosti uključenih stranaka za održavanje i plovidbenost zrakoplova te postupak prijavljivanja svih odstupanja/neočekivanih događaja na zrakoplovu);
- C. Kontinuirana plovidbenost (poglavlje u kojem su definirani zadaci u održavanju, na čemu bazirati i kako kreirati program održavanja zrakoplova, koji se podaci trebaju prikupljati kod izmjena ili popravaka zrakoplova, kako voditi sustav dokumentacije o održavanju i plovidbenosti zrakoplova);
- D. Standardi održavanja (definira kako voditi zapise o održavanju, greškama i nedostacima zrakoplova);
- E. Komponente (definira klasifikaciju komponenti, njihovu instalaciju i održavanje);
- F. Organizacija za održavanje (definira zahtjeve za agencije koje se bave održavanjem);
- G. Organizacija za vođenje kontinuirane plovidbenosti (definira izgled i zahtjeve koje je nužno zadovoljiti za izdavanje certifikata o plovidbenosti zrakoplova);
- H. Potvrda o puštanju u upotrebu (definira zahtjeve u izdavanju potvrde o puštanju zrakoplova ili komponente u rad);
- I. Potvrda o provjeri plovidbenosti (definira izgled i zahtjeve koje je nužno zadovoljiti za izdavanje certifikata o plovidbenosti zrakoplova) [5].

U PART 145 dani su zahtjevi koje organizacija mora zadovoljiti da bi mogla biti ovlaštena za održavanje zrakoplova i sastavnih dijelova. Podijeljen je u 2 sekcije: Odjeljak A - Tehnički zahtjevi te Odjeljak B - postupci za nadležna tijela.

Nadležno tijelo je organizacija kojoj su dodijeljene odgovornosti za izdavanje, produživanje, mijenjanje, privremeno ili trajno odluzimanje odobrenja za održavanje.

U Odjeljku A, PART 145 dani su zahtjevi za objekte, osoblje, opremu i alate, vođenje dokumentacije o održavanju, izdavanje potvrde o održavanju, prijavljivanje događaja, sustave kvalitete itd. U Odjeljku B utvrđuju se administrativni postupci koje nadležno tijelo mora poštovati kod provođenja svojih zadataka i odgovornosti vezanih uz izdavanje, kontinuiranu plovidbenost, mijenjanje, privremeno ili trajno oduzimanje odobrenja organizacijama za održavanje.

Tipovi održavanja zrakoplova koje provodi ovlaštena PART 145 organizacija, prema tehnologiji održavanja su:

- linijsko održavanje,
- bazno održavanje,
- radioničko održavanje.

Linijsko održavanje (eng. *Line Maintenance*) provodi se kako bi se osiguralo da je zrakoplov prikladan i spreman za planirani let. Odnosi se na manje, predviđene i nepredviđene radove na zrakoplovima koji se obavljaju tako što zrakoplov ne izlazi iz redovnog prometa. Pregledi koji se obavljaju u okviru linijskog održavanja uglavnom su vezani uz preventivne preglede i provjere, a izvodi se primarno na otvorenom prostoru, bez obaveze korištenja hangara i posebnih uvjeta za rad.

Bazno održavanje (eng. *Base Maintenance*) podrazumijeva zadatke održavanja koje zahtijevaju posebne uvjete rada, posebne tehnologije ili duže zadržavanje zrakoplova na radovima održavanja.

Radioničko održavanje (eng. *Workshop Maintenance*) obuhvaća održavanje pogonske grupe (motora) i svih popravljivih dijelova na zrakoplovu.

Zračni prijevoznici su odgovorni za provedbu održavanja u za to ovlaštenim organizacijama za rad prema PART 145 nadležnim tijelima [6].

EASA je također donijela propise vezane za edukaciju i licenciranje tehničkog osoblja, a to su:

- Part 66 Licenciranje tehničkog osoblja,
- Part 147 Ustanove za školovanje tehničkog osoblja [7].

Dodatno, propisi kojima je regulirano održavanje zrakoplova su i PART 21: Inicijalna plovidbenost, te PART T: Zrakoplov registriran u trećoj zemlji (koji je izvan EU).

Od ulaska Republike Hrvatske u Europsku Uniju, u Hrvatskoj se izravno primjenjuje Uredba Komisije (EU) br. 1321/2014 od 26. studenoga 2014. o kontinuiranoj plovidbenosti zrakoplova i aeronautičkih proizvoda, dijelova i uređaja, te o odobravanju organizacija i osoblja uključenih u te poslove, sa svim izmjenama i dopunama koje kontinuirano stupaju na snagu [4].

Osnovni zakonski propisi koji reguliraju korištenje i održavanje zrakoplova također su:

- Zakon o zračnom prometu - osnovni zakon koji donosi Republika Hrvatska,
- Pravilnici - donosi ih nadležno ministarstvo na temelju Zakona o zračnom prometu [8].

3. Model održavanja zrakoplova i motora temeljem MSG koncepta

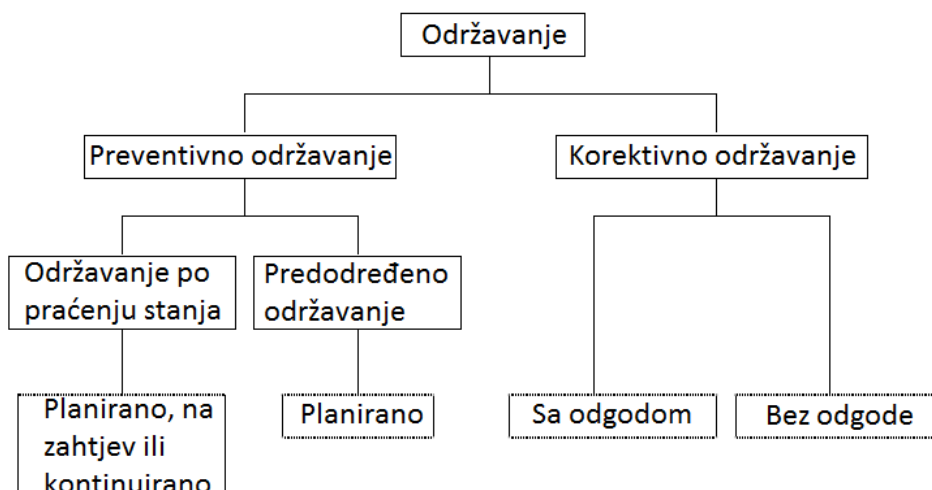
Prema kriteriju ispravnosti sustava u trenutku kad se provodi postupak održavanja, održavanje se generalno klasificira kao korektivno, preventivno i održavanje prema stanju. Održavanje prema stanju smatra se podvrstom preventivnog održavanja.

Korektivno održavanje primjenjuje se kod pozicija čiji otkaz ne može utjecati na sigurnost ili otkaz drugih pozicija, odnosno na pozicijama čiji otkaz ne predstavlja otkaz vitalnog sustava koji pak za posljedicu može imati zastoje, havariju ili velik materijalni trošak. Ovaj vid održavanja može se primjeniti na pozicijama gdje se kvar smije dogoditi. Ono ima smisla na uređajima i pozicijama visoke pouzdanosti (npr. digitalna elektronika) koji imaju malu učestalost otkaza i sa malim vremenom i troškom otklanjanja otkaza. U većini slučajeva dugom eksploatacijom učestalost otkaza raste pa starenjem korektivno održavanje može postati neekonomično. Velika je prednost ovog modela održavanja u korištenju maksimalnog resursa komponente, što rezultira niskom cijenom održavanja. Nedostatak je nemogućnost preciznog planiranja (vrijeme, mjesto, tip i opseg otkaza) i neprimjenjivost za održavanje vitalnih pozicija i uređaja čiji otkaz nije prihvatljiv. Kod pozicija koje se održavaju po korektivnom modelu, programi *monitoringa* mogu poslužiti kao kvalitetan dijagnostički alat.

Preventivno održavanje je takvo održavanje gdje se zahvat održavanja provodi prije nastupa otkaza komponente ili sustava. Prednost ovog tipa održavanja je primjenjivost na vitalnim funkcijama, olakšano planiranje te očuvanje razine pouzdanosti u kasnijoj fazi vijeka uređaja.

Održavanje prema stanju (eng. *Condition Based Maintenance* - CBM) definira se kao održavanje po potrebi, a provodi se kada dođe do pada performansi uređaja. CBM podrazumijeva da se performanse zrakoplovnih sustava kontinuirano prate kako bi se nepravilnosti uočile na vrijeme i pokrenule aktivnosti održavanja.

Na slici 1 grafički je prikazana podjela prema tipovima održavanja.



Slika 1. Podjela održavanja prema normi EN 13306:2010 [1]

3.1. MSG koncept održavanja

Prvi propis za održavanje zrakoplova, nakon intenzivnijeg razvoja zračnog prometa donijele su vlasti u SAD-u 1930. godine. Tim propisom određeno je održavanje zrakoplova prema definiranim fiksnim intervalima (eng. *Hard Time*).

Šezdesetih godina prošlog stoljeća američko udruženje *Air Transport Association* osnovalo je radnu grupu (eng. *Maintenance Steering Group* – MSG) čiji je zadatak bio razviti novi pristup u održavanju zrakoplova koji bi se bazirao na zatečenom stanju (eng. *On condition*) za razliku od dotadašnjeg koncepta remonta za svaku komponentu u predviđenom vremenu. Radna grupa izdala je 1986. godine vodič nazvan *Maintenance Evaluation and Program Development*, koji se još naziva i MSG-1 modelom. U MSG-1 predstavljena je logika odlučivanja pomoću koje se kreirao rasporeda održavanja za Boeingov zrakoplov B747-100 kako bi osigurala sigurnost i pouzdanost novim zrakoplovima za različite zrakoplovne operacije. Ovaj pristup udaljio se od tradicije remonta i zamjene komponenti u strogo definiranim vremenskim intervalima, no i dalje su u planovima održavanja korištene i *hard time* i *on condition* procedure [9,10].

MSG -1 se pokazao vrlo uspješnim jer je:

- Štedio novac,
- Štedio vrijeme,
- Povećao iskoristivost komponenti.

Nakon uspjeha filozofije MSG-1, zaključilo se da bi se isti pristup trebao primijeniti na druge zrakoplove. Stoga je MSG postao primjenjiv na više zrakoplova tako što je postao općenitiji po opsegu i prirodi.

Godine 1970. unaprijeđenjem MSG-1 propisa kako bi program bio primjenjiv za zrakoplove novije generacije, stvoren je MSG-2. MSG-2 je korišten za razvoj planiranog održavanja za zrakoplove iz 1970-ih kao što su L1011 i DC-10. MSG-2 koristio je pristup odozdo prema gore, tj. od analiziranja grešaka u komponentama sustava prema funkcioniranju cijelog sustava (eng. *Bottom-up*). Uvedeno je kontinuirano praćenje radnih parametara (eng. *Condition Monitoring*), a prikupljeni podaci uspoređivali su se sa referentnim vrijednostima kako bi se bilo kakvi problemi u radu komponente ili sustava uočili na vrijeme [9, 10].

S vremenom se pokazalo da je MSG-2 imao sljedeće nedostatke:

- Ne razlikuju se zadaci održavanja koji se obavljaju iz sigurnosnih od onih koji se obavljaju iz ekonomskih razloga;
- Programi su postali vrlo nepraktični i bilo je teško upravljati podacima jer su MSG-2 zahtjevi bili postavljeni na način da se puno komponenti moralo individualno pratiti;
- Dolaskom novih zrakoplovnih sustava koji su postali kompleksniji, program održavanja kreiran prema MSG-2 nije bio dovoljno efikasan;
- MSG-2 nije uzimao u obzir zakonske propise vezane uz toleranciju oštećenja i evaluaciju zamora materijala od kojih su dijelovi zrakoplova napravljeni.

Na temelju utvrđenih slabosti MSG-2, isti je zamijenjen MSG-3 dokumentom koji je donesen 1980. godine. Uz brojna ažuriranja tijekom godina, MSG-3 model koristi se i danas u kreiranju inicijalnih zahtjeva za održavanje zrakoplova. Cilj MSG-3 je predstaviti metodologiju koja će se koristiti za razvoj planiranih zadataka održavanja i intervala koji će biti prihvatljivi za regulatorna tijela, operatere i proizvođače. Glavna ideja ovog koncepta je prepoznati pouzdanost sustava i komponenti zrakoplova, izbjeći nepotrebne zadatke održavanja i postići veću učinkovitost.

Temeljna načela su:

- Održavanje je učinkovito samo ako je zadatak primjenjiv,
- Nema poboljšanja pouzdanosti pretjeranim održavanjem,
- Nepotrebni zadaci održavanja također mogu dovesti do ljudske pogreške,
- Nekoliko složenih sklopova je sklono trošenju,
- Praćenje i održavanje na temelju stanja (eng. *Condition Based Monitoring*), je općenito učinkovitije od remonta prema fiksnom rasporedu održavanja (eng. *Hard Time*),
- Pouzdanost se poboljšava samo modifikacijom,
- Ekonomski aspekt - održavanje možda neće biti potrebno ako je dio koji je potrebno zamijeniti još uvijek u zadovoljavajućem stanju, ili u slučaju otkaza ne utječe na sigurnost zrakoplova. Zrakoplov je siguran za korištenje ako uz neispravnosti zadovoljava zahtjev minimalne ispravnosti

opreme (eng. *Minimum Equipment List* - MEL). Na taj se način smanjuju troškovi nepotrebne zamjene dijelova.

Tijekom kreiranja procesa održavanja, MSG-3 logika definira program redovitog održavanja sastavljen od grupa redovitih radnih zadataka koji se trebaju izvršavati u određenim intervalima.

Za razliku od MSG-2, pristup u metodologiji MSG-3 je odozgo prema dolje (eng. *Top-Down*), odnosno analizira nepravilnosti od razine funkcioniranja cijelog sustava prema pojedinim komponentama i fokusira se na moguće posljedice zakazivanja komponenti. MSG-3 razlikuje moguće posljedice zakazivanja u više kategorija – posljedice koje imaju utjecaja na sigurnost, posljedice koje imaju utjecaja na operativnost zrakoplova i one koje imaju utjecaja na ekonomski aspekt. Prema tipu mogućih posljedica, odabiru se konkretni zadaci održavanja ili skupine zadataka održavanja [10,11].

U MSG-3 zadaci održavanja dijele se u 3 kategorije:

1. Program održavanja zrakoplovnih sustava i motora - uključuje sve planirane funkcionalne i operativne zadatke održavanja zrakoplovnih sustava, pomoćne jedinice napajanja zrakoplova APU (eng. *Auxiliary Power Unit*), motora i drugih komponenti. Primjeri zadataka u ovoj kategoriji su podmazivanje i zamjena istrošenih dijelova, vizualna i operativna provjera kojom se ustanovljava ispunjava li komponenta svoju svrhu, provjera funkcionalnosti, obnova ili zamjena dijelova nakon isteka definiranog životnog vijeka.
2. Program za održavanje strukture zrakoplova – obuhvaća zadatke kojima se detektira pravovremena detekcija i popravak strukturalnih oštećenja nastalih tijekom upotrebe zrakoplova, primjerice detekcija korozije, pucanja materijala zbog zamora itd.
3. Program inspekcije zona zrakoplova – opisuje provjere općeg stanja i sigurnosti spojeva strukturalnih jedinica i sustava koji pripadaju definiranoj zoni. Primjeri zadataka su vizualna provjera integriteta hidrauličkih cijevi, električnih žica, curenje tekućina itd.

Svaka kategorija sadrži metodologiju i posebne dijagrame logike odlučivanja [11].

Revizijama MSG-3 filozofije kroz godine, dodane su metodologije za bolje pokrivanje svih mogućih zakazivanja, npr. Program prevencije i kontrole korozije (eng. *Corrosion Prevention and Control Program*), Unaprijeđena inspekcija zona zrakoplova (eng. *Enhanced Zonal Analysis*) itd.

MSG-3 donosi niže troškove održavanja s tipičnim uštedama u rasponu od 15% do 25% za isti tip zrakoplova u odnosu na MSG-2 [12].

3.2. Izrada početnog programa održavanja

Osnovni dokument za izradu Programa održavanja je MSG-3.

Proces izrade programa održavanja uključuje osnivanje radnih grupa stručnjaka za održavanje (eng. *Maintenance Working Groups* – MWG) koje imenuje upravljački odbor za industriju (eng. *Industry Steering Committee* - ISC). MWG provodi analizu i izrađuje plan održavanja prema MSG-3 logici.

Radnu grupu MWG mora odobriti civilna zrakoplovna vlast proizvođača zrakoplova (eng. *Civil Aviation Authority* - CAA) i zatim se kreira Odbor za ocjenjivanje održavanja (eng. *Maintenance Review Board* -MRB).

Prije uvođenja novog zrakoplova, proizvođač - nositelj certifikata tipa (eng. *Type Certificate* - TC) – mora pripremiti i dostaviti na odobrenje relevantnim tijelima za ocjenu ploidbenosti osnovni minimum predviđenih zahtjeva za održavanje strukture, sustava i komponenti zrakoplova. Ti zahtjevi navedeni su u izvještaju odbora za ocjenjivanje održavanja (eng. *Maintenance Review Board Report* – MRBR).

Nakon odobrenja od strane lokalnih regulatornih tijela, MRBR se koristi kao okvir oko kojeg se svaki zračni prijevoznik razvija vlastiti individualni program održavanja.

Iako se programi održavanja mogu uvelike razlikovati, početni zahtjevi za određeni zrakoplov bit će jednaki za sve prijevoznike [11].

Izvještaj MRBR proizvođač zrakoplova šalje korisniku zrakoplova kojem navedeni izvještaj služi kao osnova za nadograđivanje programa održavanja i konačnu izradu Dokumenta za planiranje održavanja (eng. *Maintenance Planning Document* - MPD).

Dokument za planiranje održavanja - MPD uključuje:

- sve radne zadatke iz MRBR prihvaćene od CAA;
- dodatne zahtjeve od strane proizvođača za koje smatra da su potrebni i koji su uključeni u certifikat za održavanje (eng. *Certification Maintenance Requirement* - CMR) – namjena tih zadataka u održavanju je detekcija skrivenih grešaka koje mogu značajno utjecati na sigurnost, osobito u kombinaciji s jednim ili više drugih specifičnih grešaka što može rezultirati katastrofalnim stanjem zakazivanja; primjer takvog zadataka je vizualna inspekcija mehanizma za upravljanje zakrilcem kormila visine koja se provodi nakon svakih 2000 ciklusa letenja;
- zahtjeve iz ograničenja ploidbenosti (eng. *Airworthiness Limitations* - AL) – dokument u kojem su opisani zakonski odobreni načini provođenja inspekcija i održavanja kojima je svrha spriječiti probleme sa strukturnim jedinicama koje značajno utječu na sigurnost; primjer takvih zadataka je detaljna inspekcija žičanih snopova oko spremnika goriva kako bi se spriječilo trenje između žica i iskrenje oko spremnika goriva;

- dodatni zahtjevi zbog modifikacija i posebno ugrađenih sustava.

Svaki MPD dokument se sastoji od:

1. broja zadatka održavanja,
2. zone u kojoj se izvodi zadatak,
3. opisa rada,
4. intervala pregleda,
5. veze s MRB dokumentom [11, 13].

Najčešće planirani zadaci MPD-a svrstavaju se u 3 kategorije u skladu s MSG-3 konceptom: Program održavanja zrakoplovnih sustava i motora, program za održavanje strukture zrakoplova i program inspekcije zona zrakoplova [11].

Zadaci održavanja koji su opisani u MPD-u ne smatraju se sveobuhvatnima. Svaki zrakoplovni prijevoznik je u konačnici odgovoran za kreiranje vlastitog rasporeda zadataka. Osim nužnih zahtjeva iz AL i CMR dokumenata, dodatni zahtjevi iz direktiva o plovidbenosti mogu biti uključeni. Također, zadaci održavanja koji se preporučuju u priručnicima za motor, APU i druge komponente mogu biti dodani. Svi ti zahtjevi zajedno u konačnici čine Odobreni program održavanja zrakoplovnog prijevoznika (eng. *Operator's Approved Maintenance Program - OAMP*) [11].

4. Mlazni motori zrakoplova

Zrakoplovni motor jedan je od najzahtjevnijih sustava na samom zrakoplovu. Pred njima su postavljeni mnogobrojni zahtjevi. Moraju imati visoku pouzdanost, pogotovo u ekstremnim uvjetima rada, malu masu i što veći omjer potiska i mase zbog postizanja niže ukupne težine zrakoplova i veće nosivosti, male dimenzije za što manji otpor i potrošnju goriva, visoku učinkovitost i nisku emisiju štetnih plinova [14].

4.1. Podjela mlaznih motora

Mlazni motori dijele se na:

- Turbomlazne motore (eng. *Turbojet*)
- Turbopropelerske motore (eng. *Turboprop*)
- Turboventilatorske motore (eng. *Turbofan*)
- Turbovratilne motore (eng. *Turboshift*)

Turbomlazni motori (eng. *Turbojet*)

Turbomlazni motor je mlazni motor koji sav svoj potisak stvara strujanjem ispušnog plina kroz mlaznicu motora. Ovaj motor je najstarija i najjednostavnija vrsta mlaznog motora. Za razliku od turboventilatorskog motora, kompletan zrak koji dolazi na usis motora ulazi u jezgru motora.

Sastavni dijelovi turbomlaznog motora su: usisnik, plinska turbina (koja se sastoji od kompresora, komore izgaranja i turbine) i mlaznika. Zrak ulazi u motor preko usisnika te se sabija u kompresoru, zatim se u komori izgaranja uz taj zrak dodaje gorivo gdje se mješavina pali i sagorjeva. Ispušni plinovi pokreću turbinu koja preko vratila pokreće kompresor. Ostatak energije stvara potrebnu silu potiska za pokretanje zrakoplova. [15].

Turbopropelerski motor (eng. *Turboprop*)

Turbopropelerski motor je mlazni motor koji najveći dio potiska ostvaruje pomoću propelera. Kao i turbomlazni motor, ovaj motor se sastoji od usisnika, kompresora, komore izgaranja, turbine i mlaznika. Energija nastala izgaranjem koristi se za pokretanje turbine koja zatim mehaničkom energijom preko vratila stvara snagu za pogon kompresora. Preostala energija pokreće turbinu za pogon propelera [14]. Jedan manji dio potiska se može ostvarivati reaktivnom silom mlaza ispušnih plinova koji izlaze iz mlaznika.

U usporedbi s turboblaznim motorom, turbopropelerski motor ima bolju učinkovitost pri nižim brzinama leta (manjom od 0,6 Mach), troši manje goriva i zahtjeva znatno manje uzletno-sletne staze [15].

Turboventilatorski motori (eng. *Turbofan*)

Turboventilatorski motor nastao je iz turboblaznog motora te su prema konstrukciji slični. Ovaj motor je dvoprotočni što znači da se dio usisanog zraka uz pomoć ventilatora usmjerava u jezgru motora, a dio je obilazi te odlazi u atmosferu ili može biti usmjeren u prostor iza turbine gdje se potom miješa s toplom strujom prije ulaska u mlaznicu što je vidljivo iz primjera na slici 2. Kod ovih motora bitan faktor predstavlja stupanj optočnosti (eng. *Bypass ratio* - BPR). Stupanj optočnosti predstavlja omjer hladne struje zraka koja prolazi izvan jezgre motora i tople struje koja prolazi kroz jezgru motora.

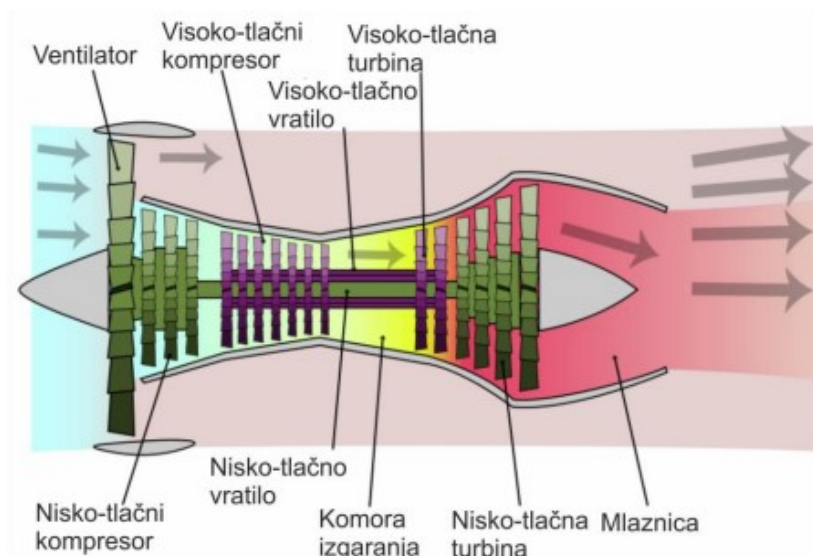
$$BPR = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}}$$

gdje je:

\dot{m}_f – maseni protok hladne struje

\dot{m} – maseni protok tople struje kroz jezgru

Kod ovog motora najveći dio potiska se stvara hladnom strujom zraka. Današnji moderni putnički zrakoplovi većinom koriste ove motore sa visokim stupnjem optočnosti koji se kreću u granicama od 5 do 12 [14].



Slika 2. Primjer mlaznog turboventilatorskog motora [14]

Turbo vratilni motor (eng. *Turboshaft*)

Turbovratilni motori veoma su slični turbopropelerskim motorima, a razlika im je u tome što se sva energija iz ispušnih plinova koristi za pokretanje vratila koja zatim preko reduktora broja okretaja pokreće nosivi propeler helikoptera, ili pogoni neki radni uređaj, npr. generator i slično. Kod ovih motora ispušni plinovi ne proizvode potisak jer se sva energija oslobađa na turbinama.

Motor najčešću primjenu ima u helikopterima kod kojih pogonsko vratilo motora uz pomoć prijenosnih zupčanika zakreće rotor.

Osim za helikoptere, ovi motori se koriste u vojnoj tehnici kao naprimjer za pokretanje tenkova ili u postrojenjima za proizvodnju električne energije [14].

4.2. Konstrukcija turboventilatorskog CFM56 motora

Današnji mlazni motori za transportne civilne zrakoplove najčešće koriste optočne dvo ili tro vratilne turboventilatorske motore. Upravljanje motorom i dijagnostika stanja kod ovih motora, potpomognuta je digitalnim sustavom za kontrolu rada motora (eng. *Full Authority Digital Engine Control* - FADEC).

Današnji optočni mlazni motori imaju BPR od 5 do 12, a oko 80% potiska se stvara hladnom strujom zraka [16].

Osnovni pokazatelji za ocjenu performansi motora su :

- Ukupan stupanj iskoristivosti η_o : (eng. *Overall efficiency*) :

$$\eta_o = \frac{F_T \cdot v}{\dot{Q}_1} = \eta_{th} \cdot \eta_p$$

gdje je :

F_T - sila potiska

v - brzina zrakoplova

η_{th} - koeficijent iskoristivosti motora (interni koef. iskoristivosti motora)

\dot{Q}_1 - razvijena toplina usljed izgaranja goriva u J/s

η_p –stupanj iskoristivosti propulzije

Predstavlja omjer umoška potiska i brzine zrakoplova (snaga propulzije) sa razvijenom toplinom uslijed izgaranja goriva. Pokazuje koliko se razvijene snage izgaranjem goriva pretvara u korisnu snagu za potiskivanje zrakoplova.

- Specifična potrošnja goriva po potisku (eng. *Thrust specific fuel consumption* – TSFC)

$$TSFC = \frac{\dot{m}_f}{F_T}$$

gdje je:

\dot{m}_f – maseni protok goriva

F_T – sila potiska

Predstavlja omjer potrošnje goriva iskazane kao maseni protok goriva u kg/s i potiska. Koristi se za ocjenu ekonomičnosti rada i izražava se u [N/kg·s].

- Specifični potisak

$$f_t = \frac{F_T}{\dot{m}_a}$$

gdje je:

F_T – sila potiska

\dot{m}_a – maseni protok odnosno potrošnja zraka

Definira se kao omjer potiska mlaznog motora i protoka odnosno potrošnje zraka motora.

- Specifična težina

$$F/W = \frac{F_T}{W}$$

gdje je:

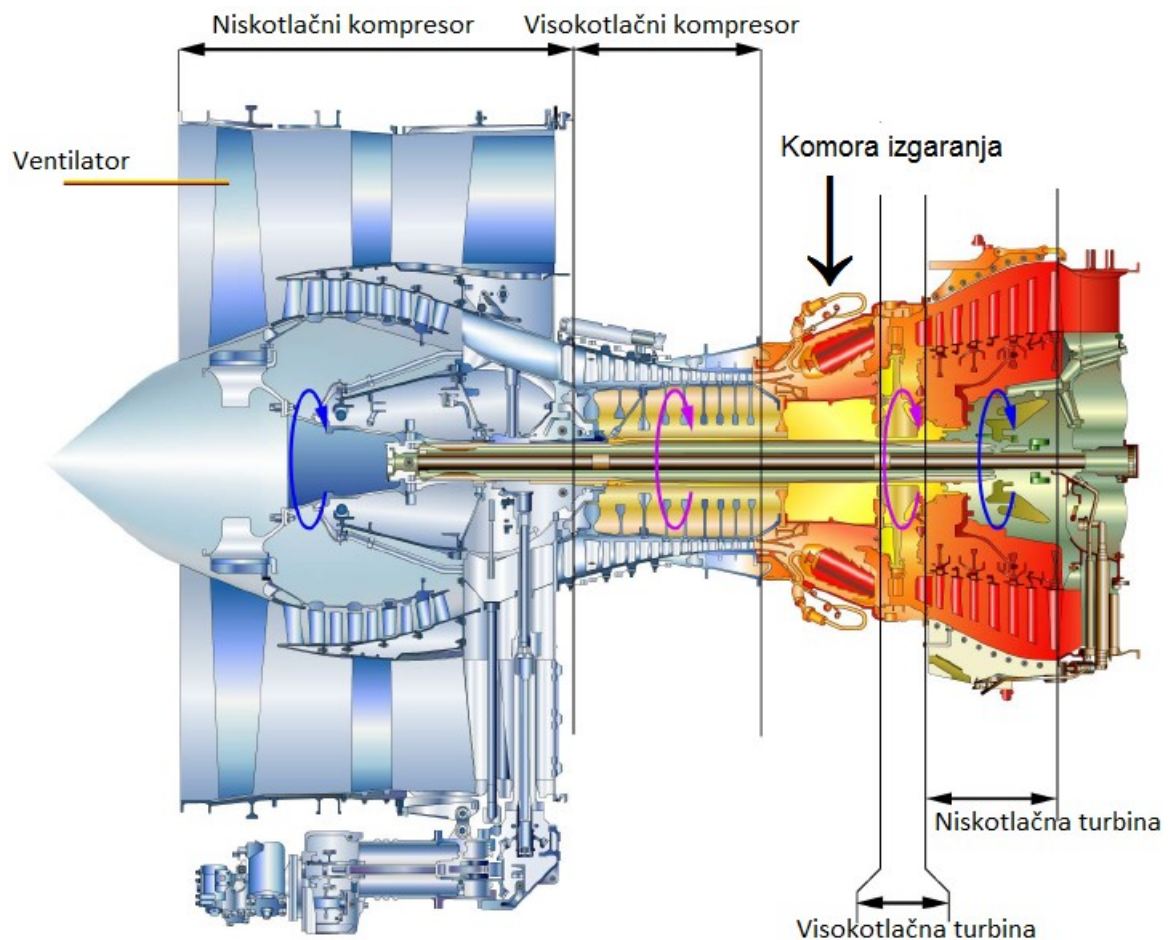
F_T – sila potiska

W – težina motora

Definira se kao omjer potiska i težine motora (eng. *F/W ratio*) [16].

Cilj je postići što manju potrošnju goriva uz što veći specifični potisak. Za posljedicu zrakoplov ima veći dolet i povećanje plaćenog tereta. Što je veći specifični potisak to je manja težina motora i smanjuju se instalacijski otpori zbog manjeg poprečnog presjeka motora [16].

Motor CFM56 je dvoprotočni dvovratilni motor. Ovaj motor koji je prikazan na slici 3 izveden je u više inačica. CFM56-2 motor prva je verzija ovog tipa motora koja je proizvedena 1979. godine i neki zrakoplovni tipovi na kojima je korišten ovaj motor su zrakoplovi DC-8, KC-135 FR i C-135 FR. CFM56-3 proizveden je 1984. godine, a motor je korišten na zrakoplovu tipa B737-300, 400, 500. Zatim motori CFM56-5A1 do 5A5 verzije proizvedene 1987. godine i CFM56-5B verzije proizvedene 1991. godine razvijeni su posebno za zrakoplove A320 obitelji. Osim tih motora postoji i CFM56-5C motor proizveden 1991. godine za zrakoplov A340 i CFM56-7B motor proizveden 1996. godine koji je namjenjen za zrakoplove tipa B737-600 do 900 [17].



Slika 3. Položaj ventilatora, kompresora, komore izgaranja i turbina na CFM56 motoru [18]

Motor CFM56-5B najbrojniji je motor koji je isporučen Airbus 320 grupi zrakoplova. Naslijedio je CFM56-5A seriju, a prednosti su mu da ima manju potrošnju goriva, manje emitira štetne plinove i ima četvero stupanjski niskotlačni kompresor. Osnovne konstrukcijsko - eksploatacijske karakteristike ovog motora prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Konstruktivno - eksploatacijske karakteristike CFM56-5B motora [19]

| | |
|--|-------------------------------------|
| Potisak na polijetanju pri ISA/SL uvjetima | 30,000–32,000 lbf= 133,45–142,34 kN |
| Stupanj optočnosti (BPR) | 5,4-6,0 |
| Ukupni stupanj povećanja tlaka | 32,6-35,5 |
| Duljina | 259,97 cm |
| Širina | 190,8 cm |
| Visina | 210,5 cm |
| Suha težina | 2,454.8–2,500,6 kg |
| Promjer ventilatora | 173 cm |
| Stupnjevi: ventilator/niskotlačni kompresor/visokotlačni kompresor | 1:4:9 |
| Stupnjevi: visokotlačna turbina/niskotlačna turbina | 1:4 |
| Komora izgaranja | Dvostruka prstenasta |
| Specifična potrošnja goriva (TSFC) na polijetanju | ~ 0,353 lbs/(lbs h) = 9,5 g/kN s |
| Maksimalna kontinuirana specifična potrošnja goriva | ~ 0,545 lb/(lbf h) = 15,4 g/(kN s) |
| Odnos potiska i mase (F/W) | 5,44-5,69 |
| Maksimalna temperatura ispušnih plinova EGT za polijetanje | 950°C |
| Maksimalna kontinuirana temperatura ispušnih plinova EGT | 925°C |
| Maksimalna temperatura ispušnih plinova EGT kod pokretanja motora | 725°C |
| Maksimalna dozvoljena brzina vrtnje niskotlačnog kompresora (N1) | 5382 o/min |
| Brzina vrtnje visokotlačnog kompresora (N2) | 15183 o/min |

5. Utvrđivanje tehničkog stanja motora

Uz pomoć napredne tehnologije, moguće je pratiti sve parametre i performanse mlaznog motora. Praćenjem performansi motora moguće je uočiti odstupanja u parametrima motora do kojih dođe nakon određenog broja sati leta ili nekog broja ciklusa te se adekvatnim i pravovremenim akcijama može spriječiti kvar, ukloniti ga ili produžiti radni vijek motora.

Analizom stanja motora i performansi omogućuje se značajno smanjenje troškova po satu leta, a uz to se povećava sigurnost [20].

Postoji mnogo metoda i postupaka praćenja stanja motora tijekom njegove eksploatacije na zrakoplovu. Neke od metoda su:

- analiza parametara radnog procesora motora,
- redovito praćenje potrošnje goriva,
- analiza kvalitete i potrošnje ulja,
- vibracijska analiza,
- vizualni pregled (endoskopski pregledi).

Analiza parametara radnog procesora i vibroakustična analiza mogu se raditi za vrijeme uporabe motora tijekom leta, a ostale metode podrazumijevaju snimanje parametara dok motor ne radi [21].

Današnji moderni putnički zrakoplovi opremljeni su nekim od sustava za stalni nadzor tehničkog stanja koje se u slučaju mehaničkih komponenti nadzire uz pomoć različitih senzora. To mogu biti senzori koji nadziru tlak, temperaturu, vibracije i ostalo.

Takav sustav se naziva ugrađeni nadzorni sustav (eng. *Onboard Maintenance System*) i omogućava detekciju neispravnosti tijekom rada, a ovi sustavi zajedno se nazivaju BITE (eng. *Built In Test Equipment*).

Osim toga, svi današnji moderni zrakoplovi opremljeni su FADEC sustavom (eng. *Full Authority Digital Engine Control*), odnosno sustavom za upravljanje i kontrolu rada motora. Sustav FADEC je integriran u sustav zrakoplova.

6. Sustav BITE

BITE (eng. *Built In Test Equipment*) je ugrađeni sustav na zrakoplovu uz pomoć kojeg se omogućava detekcija neispravnosti tijekom rada zrakoplova.

Sistem je sastavljen od više zamjenjivih jedinica (eng. *Line replaceable unit-LRU*), koje mogu biti: računalo, senzor ili aktuator-pokretač.

LRU je komponenta koja se može lako promijeniti na zrakoplovu tijekom operacija linijskog održavanja [22].

6.1. Razvoj BITE sustava

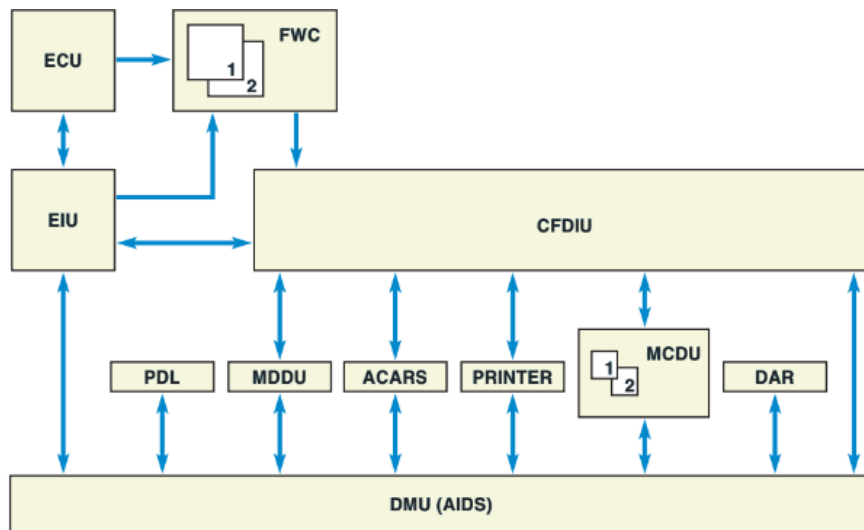
Kako su sustavi avionske elektronike postajali sve sofisticiraniji, razvila se sve veća potreba za pružanjem pomoći pri održavanju tehničarima linijskog održavanja. Kao odgovor na ovu potrebu, zrakoplovne tvrtke zahtijevale su od proizvođača zrakoplova da osiguraju ugrađenu opremu za testiranje (BITE) za različite avionske sustave. BITE sustavi pružaju dijagnostičke informacije u slučaju kvarova sustava i povezane značajke za održavanje.

Avionski sustavi sastoje se od brojnih linijskih zamjenjivih jedinica (LRU), od kojih svaka čini zamjenjivu elektroničku komponentu. Rani pokušaji ugradnje BITE-a unutar analognih avionskih sustava nisu bili osobito uspješni, a obično su rezultirali korištenjem tehnika pri čemu su mnogi LRU-ovi ili cijeli sustavi zamijenjeni sve dok se kvar ne otkrije i zatim ispravi. Pojavom digitalne avionike pojavila se prilika za razvoj sofisticiranih i učinkovitih BITE sustava. U modernom avionskom sustavu, svaki LRU komunicira s drugim LRU-ovima putem serijskog prijenosa i primanja digitalnih informacija formatiranih u standardiziranim digitalnim riječima. Na primjer, LRU može očitati visinu zrakoplova i zatim formulirati digitalnu riječ koja, između ostalog, uključuje binarni prikaz nadmorske visine. Ova digitalna riječ prenosi se na drugi LRU koji bi, na primjer, mogao biti sustav digitalnog prikaza na ploči s instrumentima u kokpitu. Jedinica za prikaz dekodira digitalnu riječ i prikazuje nadmorsku visinu u odgovarajućem decimalnom formatu. Druge podgrupe sustava mogu se sastojati od analognih senzora koji komuniciraju putem posebnih i namjenskih analognih signalnih linija [23].

6.2. Načelo rada sustava BITE

Zbog sigurnosnih razloga, LRU-ovi su stalno kontrolirani, mogu biti testirani, a može se izvršiti i otklanjanje problema. BITE sustav može provoditi test kod prvog pokretanja ili periodički. Tijekom normalnih operacija, sustav se stalno nadzire, a vrši se nadzor ulaznih i izlaznih jedinica [24].

BITE koncept služi za sustav nadzora tehničkog stanja na zrakoplovu (eng. *On board Maintenance*) prikazanog na slici 4.



Slika 4. On Board Maintenance sustav [25]

Namijenjen je za bilježenje podataka o radu sustava na zrakoplovu. Podaci se pohranjuju, mogu se ispisati printerom, pohraniti se u memoriju računala ili se mogu poslati putem radio veze ACARS sustavom (eng. *Aircraft Communication Addressing And Reporting System* - ACARS), operatoru u službu održavanja zrakoplova.

Neki dijelovi ovog sustava su računalo za nadzor i kontrolu rada sustava (eng. *Data Management Unit* - DMU) koje je povezan direktno sa višenamjenskim upravljačkim zaslonom (eng. *Multipurpose Control Display Unit* – MCDU), sučeljem (eng. *Engine Interface Unit* – EIU), kontrolnom jedinicom motora (eng. *engine control unit* - ECU) i centraliziranim sustavom prikaza grešaka (eng. *Centralized Fault Display System* – CFDIU) [25]

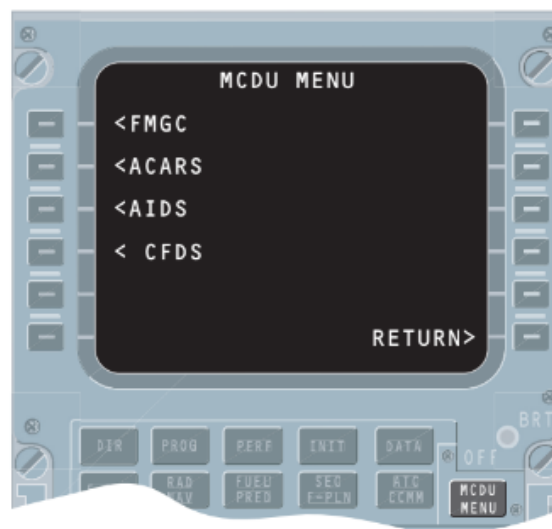
Ukoliko se kvar dogodi, on može biti trajni ili kratkoročni. Nakon detekcije kvara, BITE ima mogućnost identificirati mogući kvar jedinice LRU-a i napraviti snimak te kontrolu stanja sustava kada se kvar dogodio. Sve informacije potrebne za održavanje i otklanjanje problema spremljene su trajnoj memoriji (eng. *Non Volatile Memory* - NVM). BITE je sustav koji nadzire ispravno funkcioniranje zrakoplovnih sustava, a u slučaju da pojedini dio na zrakoplovu ne ispunjava svoju predviđenu funkciju, BITE sustav izdaje upozorenje.

Sustav radi sa dva seta memorijskih kartica na principu da prvo zabilježi set podataka na prvu memorijsku karticu, a zatim testira drugu memorijsku karticu tako da iščitava i upisuje različite testne uzorke. Ako se očitani uzorak razlikuje od napisanog uzorka to ukazuje na grešku te se izdaje upozorenje. Ako se očitani uzorak ne razlikuje, svi se podaci kopiraju na drugu memorijsku karticu, te se procedura ponavlja da se memorija prve kartice testira. Ovaj postupak se ponavlja u određenim intervalima [24].

Distribuirani BITE program ima interaktivnu strukturu u kojoj program prima ulazne podatke uključujući naredbe koje daje operater i daje izlazne podatke uključujući podatke o greškama.

Centralizirani sustav prikaza grešaka (eng. *Centralized Fault Display System – CFDIU*) prikuplja i objedinjuje podatke te izvještava o greškama LRU-a kako bi pomogao letačkoj posadi i osoblju za održavanje u postupcima održavanja. Sve podatke moguće je pratiti preko MCDU koji je prikazan na slici 5. Ovaj sustav usmjeren je na središnji računalni sustav za održavanje koji je integriran u sustav zrakoplova i sustav za prikupljanje i analizu informacija o održavanju.

MCDU je mjesto gdje se prikazuju svi očitani podaci. Osim prikaza očitanih vrijednosti relevantnih pilotu tijekom leta, ima mogućnosti dijagnostike kvarova te printanja dijagnostike potrebne tehničarima za održavanje.



Slika 5. MCDU Menu [25]

Glavne prednosti BITE-a su:

- Jedno sučelje (kokpit),
- Jednostavna identifikacija kvara,
- Pojednostavljena dokumentacija,
- Standardizirana oprema [26].

Sustav BITE klasificira kvarove u 3 klase.

Kvar klase 1 ima utjecaj na rad motora tijekom leta kada se i pojavljuju, a takav kvar nakon slijetanja može imati ozbiljan utjecaj na sljedeći planirani let ukoliko se ne poduzmu korektivne radnje. Ovakvi kvarovi pokazuju se odmah na zaslonu MCDU kao upozorenje pilotu i popraćene su zvučnim upozorenjem. Razlikuju se 3 razine kvara klase 1. Razina 3 je najgori slučaj i to je crveno upozorenje, koje ukazuje na hitnu situaciju i posada mora odmah poduzeti korektivne mjere tijekom leta. Razina 2 prikazuje se kao žuto upozorenje koje ukazuje na rad motora koji nije normalan ni uobičajen, a korektivne mjere nisu odmah potrebne već u što skorije vrijeme. Razina 1 je razina opreza gdje posada mora imati vrijednosti za koje je upozorenje izdano pod stalnim nadzorom, te spada u stanje uzbune.

Kvar klase 2 nemaju trenutne posljedice tijekom leta ili na sljedeći, ali kvar je potrebno popraviti prvom prilikom kada se zrakoplov vrati u svoju bazu.

Kvarovi klase 3 nemaju operativnih posljedica tijekom leta ili sljedećeg planiranog leta. Ne prikazuju se letačnoj posadi tijekom leta niti na zemlji. Ovakav tip kvara zadovoljava MEL listu i dostupan je na uvid samo osoblju za održavanje ispisivanjem dijagnostike putem MCDU-a [25].

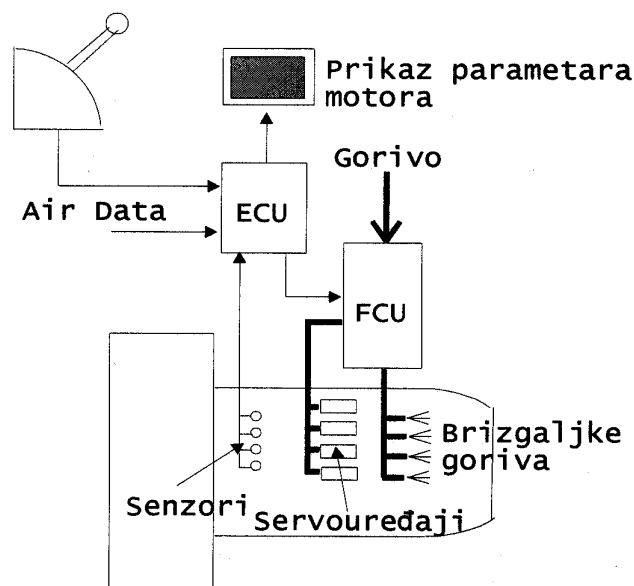
7. Sustav za kontrolu rada motora FADEC

FADEC je akronim za eng. *Full Authority Digital Engine Control*, odnosno to je sustav za kontrolu rada motora.

Koristi se za digitalno upravljanje svim aspektima performansi i radnim uvjetima motora tijekom rada. Uz pomoć programiranja kontrolne jedinice motora (eng. *Engine Control Unit* - ECU), proizvođač može definirati najviše vrijednosti iznad kojih motor ne može raditi.

Ovaj sustav se sastoji od računala, koji se naziva elektronički upravljač rada motora (eng. *Electronic Engine Controller* - EEC) ili kontrolna jedinica motora, sučelje (eng. *Engine Interface Unit* – EIU) ili uređaj preko kojeg ECU komunicira sa ostalim dijelovima sustava, zatim hidro-mehaničke jedinice (eng. *Hidromechanical Unit* - HMU). HMU na osnovi zahtijeva ECU-a modulira tlak na izlazu iz HMU-a prema hidrauličkim pokretačima za kontrolu rada motora kao što su: upravljanje zazorom lopatica visokotlačne turbine između kućišta i vrhova lopatice turbine (eng. *High Pressure Turbine Clearance Control* - HPTCC), upravljanje zazorom lopatica niskotlačne turbine između kućišta i vrhova lopatice turbine (eng. *Low Pressure Turbine Clearance Control* - LPTACC), protupumpažni ventili s promjenjivim ispuštanjem zraka iz kompresora (eng. *Variable Bleed Valves* - VBV), upravljanje promjenjivim nagibom statorskih lopatica (eng. *Variable Stator Vanes* - VSV) sustavima na zrakoplovu itd.[27]

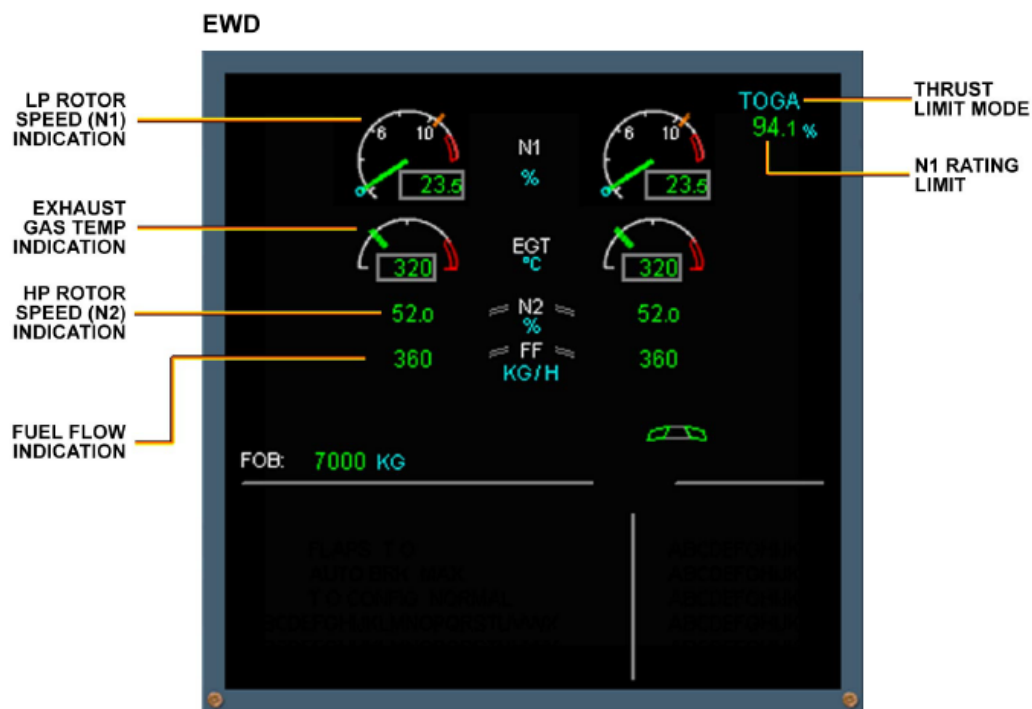
Ako se otkrije kvar, taj kvar se najprije klasificira, a zatim se te informacije pohranjuju [28].



Slika 6. Komponente FADEC sustava [16]

FADEC koncept prikazan je na slici 6. Sustav reagira na ulazne informacije koje dobiva od pilota, ali također koristi podatke senzora čija su očitavanja pretvorena u električne signale, a daju informacije o različitim vrijednostima kao što su temperatura motora, tlak u motoru, protok goriva, gustoća zraka i drugi, a sve u cilju kako bi automatski prilagodili postavke motora da radi s maksimalnom učinkovitošću za dane uvjete [29].

Računalo obrađuje ulazne podatke s ovih senzora i prenosi informacije na zaslone u kokpitu kako je prikazano na primjeru slike 7. Piloti kontinuirano prate vrijednosti o stanju motora i okoline iz kokpita.



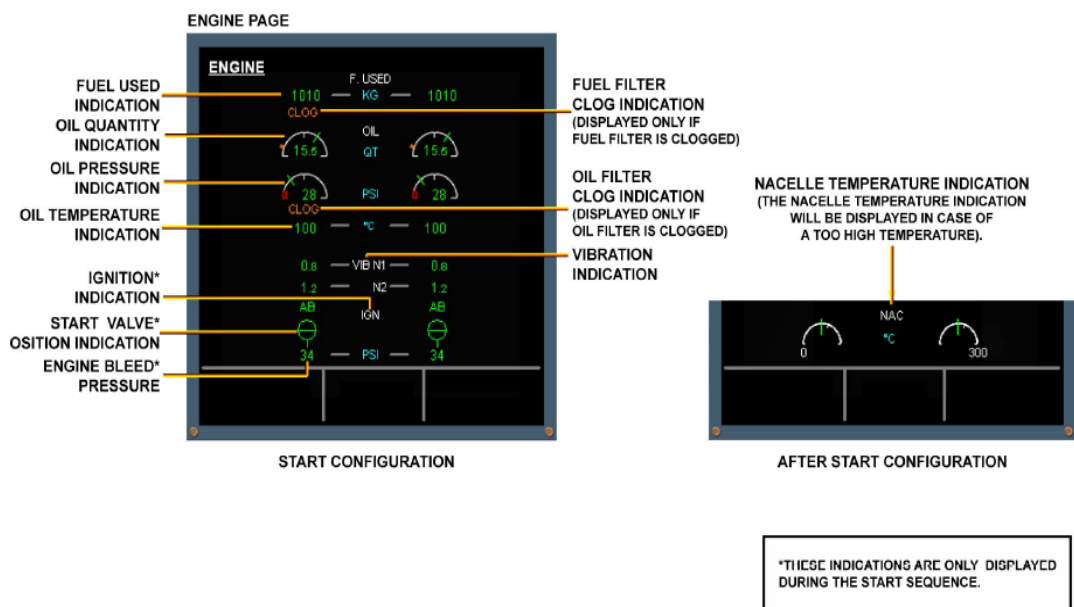
Slika 7. Prikaz parametara primarnih vrijednosti na zaslonu u kokpitu [18]

Postoji jako puno senzora za različite komercijalne zrakoplove, a neki od uobičajenih senzora koji se koriste u zrakoplovima su:

- **Senzori protoka** – najčešće mjere potrošnju odnosno protok goriva.
- **Senzori tlaka** – mjere tlak u hidrauličkim sustavima, sustavima za kočenje, podizanje i spuštanje stajnog trapa, motornom ulju, spremnicima kisika, tekućinama za grijanje i hlađenje. Promjena parametra tlaka može ukazivati na progresivni (ili katastrofalni) kvar pumpe, kanala ili ventila.
- **Senzori temperature** – mjere temperaturu hidrauličkih ulja, goriva, rashladnih sredstava, temperaturu ispušnih plinova-EGT, temperaturu kućišta, temperature između slobodne turbine i turbine snage koja se uobičajeno koristi kod turboprop motora (eng. *Interstage Turbine Temperature* - ITT). Temperature preko normalnih vrijednosti mogu

ukazivati na kvar, potrošenost, curenje ili blokadu komponente, ovisno o sustavu koji se nadgleda. Ovi senzori uključuju bimetalne mjerne temperature, termometre i termoelemente. Na primjeru prikazanom na slici 8 vidljivo je očitavanje previsoke temperature kućišta.

- **Barometarski visinomjeri** - mjere promjene u statičkom tlaku zraka kako bi se odredila visina zrakoplova.
- **Indikatori brzine** - izračunavaju stvarnu brzinu zraka na temelju podataka pitot cijevi i mjerenjem statičkog i totalnog tlaka, tj. takozvani IAS (eng. *Indicated Air Speed*).
- **Nadzor vibracija** - sva rotirajuća oprema pokazuje određeni stupanj vibracija. Kako oprema degradira ili izlazi iz poravnog položaja, količina vibracija se povećava. Vibracije spadaju među sekundarne parametre čije se vrijednosti prate na ekranu računala u kokpitu što je prikazano na primjeru na slici 8. Povećanje vibracija može ukazati na stanje neuravnoteženosti ili progresivni kvar ležaja osovine ili druge komponente [30].



Slika 8. Prikaz parametara sekundarnih vrijednosti na zaslonu u kokpitu [18]

Prijašnjim zrakoplovnim motorima upravljali su ručno pilot ili inženjer leta koji je prilagođavao snagu i rad motora ovisno o različitim uvjetima ili fazama leta, a sada to radi FADEC. Pomoću FADEC sustava poboljšala se sigurnost i osigurala se veća pouzdanost i efikasnost motora [28].

FADEC radi tako što prima višestruke ulazne varijable trenutnog stanja leta uključujući tlak i temperaturu zraka, položaj ručice za potisak, temperature motora, tlakove motora i mnoge druge parametre. Elektronički upravljač radom motora (eng. *Electronic Engine Controller* – EEC ili *Electronic Control Unit*-ECU) prima ulazne podatke i analizira ih do 70 puta u sekundi. Iz navedenih parametara ECU određuje potrebnu količinu goriva, nagib statorskih lopatica kompresora, položaj ventila za odzračivanje zraka itd. FADEC također kontrolira proces pokretanja motora. Osnovna svrha FADEC-a je osigurati optimalnu učinkovitost rada motora za dane uvjete leta [31].

FADEC ne samo da osigurava učinkovit rad motora, već također sprječava prekoračenja određenih vrijednosti motora bez intervencije pilota. ECU se može programirati da automatski poduzme potrebne mjere kao oduzimanje dotoka goriva u motor ili smanjene vrtnje niskotlačnog kompresora u slučaju potrebe.

Neke od prednosti FADEC sustava su:

- Efikasnija potrošnja goriva,
- Zaštita rada motora unutar granica propisanih ograničenja,
- Integracija sustava motora i zrakoplova,
- Praćenje rada i dijagnostika rada motora,
- Smanjenje broja parametara koje mora nadzirati letачka posada i redundantnost u slučaju kvara.

FADEC sustav nema dostupni ručni-mehanički oblik upravljanja već je sva kontrola motora digitalna. Iz tog razloga ovaj sustav ima neke nedostatke koji mogu biti:

- U slučaju potpunog kvara FADEC-a ne postoji način da se kontrola ručno premesti te kao posljedica kvara FADEC sustava, ni motor neće raditi;
- Pilot nema ručne kontrole za ponovno pokretanje motora, povećanje potiska ili druge funkcije;
- Visoka složenost sustava u usporedbi s hidromehaničkim, analognim ili ručnim sustavima upravljanja;
- Visoki naponi za razvoj i validaciju sustava zbog složenosti.

S obzirom da se rad motora toliko oslanja na automatizaciju, sigurnost je jako važna. Otpornost na otkazivanje je osigurana u obliku dva ili više odvojenih, ali identičnih digitalnih kanala. Svaki kanal može pružati sve funkcije motora bez ograničenja [32].

Ventili i aktuatori su opremljeni sa dvostrukim sensorima kako bi pružali kontrolnoj jedinici motora ECU povratne signale. Svi kontrolni ulazi su dvostruki, ali su neki parametri koji se koriste za nadzor i indikaciju pojedinačni. Također FADEC je izveden kao dio BITE sistema, što znači da ima mogućnost prepoznati greške unutar i izvan FADEC sustava [33].

Opis sustava FADEC na CFM56 motoru

Funkcije upravljanja CFM 56 motorom uključuju:

- Upravljanje napajanjem goriva,
- Upravljanje protupumpažnim ventilima s promjenjivim ispuštanjem zraka iz kompresora (eng. *Variable Bleed Valves* - VBV),
- Upravljanje promjenjivim nagibom statorskih lopatica (eng. *Variable Stator Vanes* -VSV),
- Upravljanje ventilima za odzračivanje (eng. *Transient Bleed Valve* - TBV),
- Regulaciju ubrizgavanja goriva u komoru izgaranja,
- Upravljanje zazorom između kućišta visokotlačne turbine i vrhova lopatice turbine (eng. *High Pressure Turbine Active Clearance Control* - HPTCC),
- Upravljanje zazorom između kućišta niskotlačne turbine i vrhova lopatice turbine (eng. *Low Pressure Turbine Active Clearance Control* - LPTCC),
- Upravljanje povratnim ventilom goriva (eng. *Fuel Return Valve* - FRV).

Integracija motora na zrakoplovu uključuje:

- Indikacije motora
- Podaci o održavanju motora
- Automatsko i ručno pokretanje
- Kontrola skretača mlaza
- Automatski potisak
- Podaci praćenja stanja [18].

Tipično polijetanje zrakoplova može ilustrirati funkciju i primjenu FADEC-a. Letačka posada prvo unosi podatke o letu kao što su: vanjski vremenski uvjeti (npr. temperatura zraka, jačina vjetera), zatim duljina uzletno-sletne staze i visina krstarenja u sustav upravljanja letom (eng. *Flight Management System* - FMS). FMS koristi ove podatke za izračunavanje postavki potiska za različite faze leta. Prilikom polijetanja, letačka posada namješta polugu potiska na unaprijed određenu postavku ili se odlučuje za polijetanje s automatskim potiskom ukoliko je to moguće. FADEC tada izračunava odgovarajuće postavke potiska pri uzlijetanju i šalje elektronički signal motorima za postizanje potrebnog potiska [34].

Sustav upravljanja letom temeljna je komponenta avionike modernog zrakoplova. FMS je specijalizirani računalni sustav koji automatizira širok raspon zadataka tijekom leta, smanjujući opterećenje letačke posade do te mjere da moderni civilni zrakoplovi ne trebaju inženjere leta ili navigatore kao članove posade tijekom leta. Primarna funkcija je upravljanje planom leta tijekom leta. Koristeći različite senzore kao što je GPS (eng. *Global Positioning System* - GPS) za određivanje položaja zrakoplova, FMS može voditi zrakoplov po planu leta. Iz kokpita, FMS se obično

kontrolira putem jedinice za upravljanje (eng. *Control Display Unit* - CDU) koja sadrži mali zaslon i tipkovnicu ili zaslon osjetljiv na dodir [35].

U seriji CFM56 FADEC se počeo koristiti u CFM56-2/3 i u modelu CFM56-5/7, koji uključuje tri važna dijela, a to su elektronički kontroler motora (EEC), hidraulička mehanička jedinica (eng. *Hydraulic Control Unit* - HMU), aktuatori i vanjski senzori. Primjer FADEC mreže CFM56 motora prikazan je na slici 9.

EEC, može izvoditi proračune i upravljati radom motora, prati stanje motora, izvršava funkciju inspekcije, može klasificirati kvar i pohraniti njegove podatke, a napaja se iz neovisnog izvora vlastitog alternatora [28].

FADEC sadrži dva identična EEC računala, označena kao dva neovisna kanala, kanal A i B.

HMU je još jedan vrlo važan dio, koji je kao upravljač gorivom (eng. *Fuel control Unit* - FCU) samo ovdje ima proširenu funkciju, može pretvarati električni signal dobiven od ECU u hidraulički signal i na taj način upravlja ventilima ili aktuatorima [31]. Uz pomoć vanjskih senzora parametri motora se dostavljaju EEC-u i provodi se kontrola opreme motora po aktuatorima [28]. Na slici 9 prikazana je povezanost cijelog sustava FADEC.

Ostale važne komponente za kontrolu i nadzor FADEC-a su aktuatori, ventili i senzori [32].

Aktuator (eng. *actuator*), je naprava kojom se na pobudu upravljačkoga signala pokretni dijelovi sustava dovode u željeni položaj, ostvaruje se njihovo gibanje ili razvija sila ili moment sile (okretni moment) kojim ti dijelovi djeluju na okolinu. U osnovi je to pretvornik koji neku ulaznu veličinu pojačava te pretvara u mehanički rad. Prema ulaznoj veličini razlikuju se hidraulični aktuator, pneumatski aktuator, električni aktuator i drugi [36].

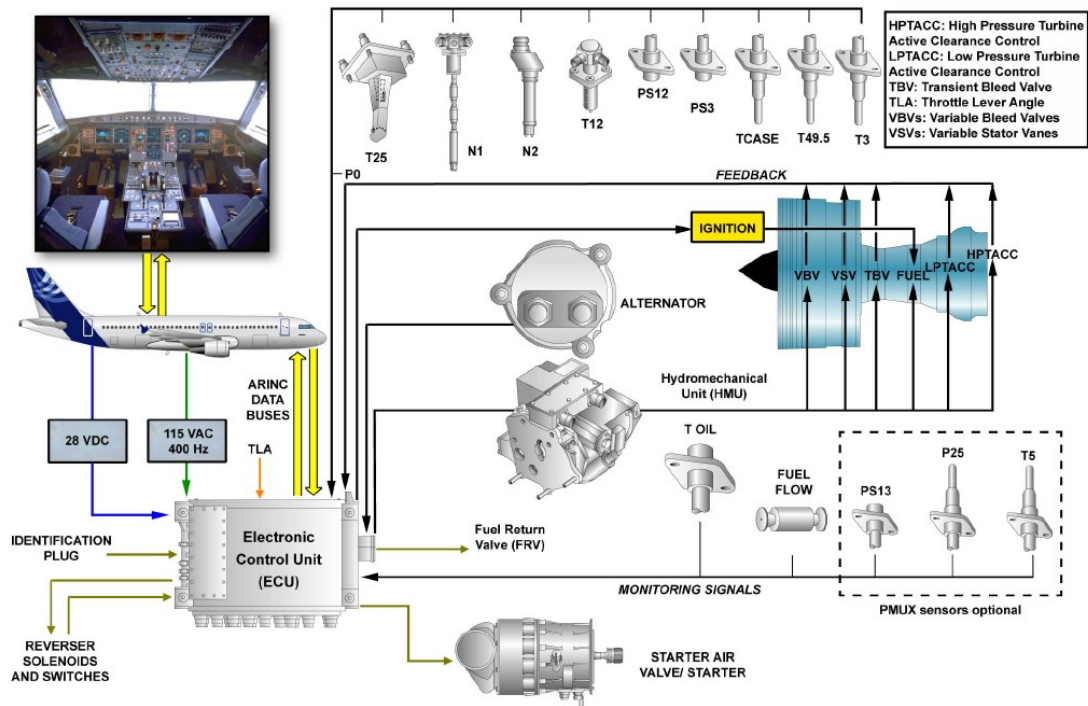
Neki od aktuatora i ventila koji se koriste su:

VBV - Regulira količinu zraka koja se odvodi od kompresora. Naziva se još i protupumpažni ventil. Ventil se otvara kod pokretanja motora, na malim potiscima i pri naglom ubrzanju, a svrha mu je da odvodi zrak u ventilatorsku struju s ciljem da spriječi nestabilan rad kompresora, odnosno pumpanje visokotlačnog kompresora. Ventil je u zatvorenom položaju pri velikom potisku.

VSV - Sustav koji zakreće statorske lopatice čime se mijenja napadni kut lopatica u odnosu na dolazne strujnice zraka i sprječava se pumpanje kompresora. Ventil je u zatvorenom položaju za vrijeme startanja motora, a u otvorenom položaju za vrijeme korištenja punog potiska motora.

LPTCC - Upravlja zazorom lopatica niskotlačne turbine s ciljem hlađenja kućišta rotora turbine pomoću zraka iz ventilatorske struje [27].

HPTCC - Upravlja zazorom lopatica visokotlačne turbine između kućišta turbine i vrhova lopatica s ciljem da kontrolira termičko širenje vratila na način da uzima zrak od četvrtog i devetog stupnja [18].



Slika 9. FADEC mreža [18]

Senzori CFM56 motora koji se koriste za kontrolu i nadzor, a prikazani su na slici 9 su i mjere sljedeće parametre:

- T25- temperaturu zraka na ulazu u visokotlačni kompresor
- N1- broj okretaja niskotlačne turbine
- N2- broj okretaja visokotlačne turbine
- T12- ulazna temperatura zraka
- PS12- ulazni tlak zraka
- PS3- tlak na izlazu kompresora visokog tlaka
- Tcase- temperaturu kućišta oko turbine
- T49.5- temperatura iza prvog stupnja niskotlačne turbine.
- T3- izlaznu temperaturu niskotlačnog kompresora
- Toil- temperaturu ulja motora
- Fuel Flow- protok goriva
- PS13- tlak na izlazu iz ventilatora
- P25- tlak na ulazu u visokotlačni kompresor
- T5- temperatura na izlazu iz niskotlačne turbine [18].

8. Praćenje trenda radnih parametara

Praćenje trenda radnih parametara (eng. *Engine Condition Trend Monitoring - ECTM*) motora je prikupljanje i analiza podataka o motoru za otkrivanje ubrzanog trošenja i drugih oštećenja dijelova. Praćenjem radnih parametara motora moguće je pratiti tehničko stanje i stabilnost rada motora [37]. Problemi kao što su rano oštećenje komponenti vruće sekcije ili curenje tekućina mogu se otkriti, procijeniti i popraviti prije nego preraste u kvar ili prizemljenje zrakoplova što za posljedicu stvara neočekivani trošak. Ranim otkrivanjem problema, mogu se izbjeći skupa sekundarna oštećenja motora i mogu se smanjiti neočekivana prizemljenja i održavanja zrakoplova. Analiza trenda radnih performansi zahtjeva kontinuirano bilježenje parametara kao što su brojevi okretaja N1/N2, protok goriva, EGT margina, vanjska temperatura zraka - OAT (eng. *Outside Air Temperature – OAT*), brzina i visina itd. i praćenje trendova promjena istih. Informacije kao što su vibracije motora, temperatura ulja i tlak ulja, pružaju dodatne podatke za analizu. Iako je moguće ove podatke prikupljati ručno, puno točnije je imati stabilno automatsko prikupljanje ovih očitavanja [38].

Praćenje stanja (eng. *Condition monitoring - CM*) kritična je komponenta prediktivnog održavanja. To je proces kojim se jedan ili više parametara povremeno mjere ili kontinuirano prate, kako bi se uvidjele značajne promjene koje obično ukazuju na mogući kvar. To omogućuje operateru da planira održavanje sa ciljem izbjegavanja kvarova i posljedica koje mogu prouzrokovati. Kontinuirano praćenje stanja najčešće se primjenjuje na rotirajućim strojevima kao što su ventilatori, kompresori, pumpe i motori s unutarnjim izgaranjem.

Stanje motora mora se pratiti zbog:

- Kontinuirane i rutinske provjere,
- Procjene performansi motora i stanja komponenti.

Praćenje stanja mora biti sastavni dio održavanja i rada motora. Potrebno je pratiti ukupne performanse motora i mehaničke parametre tijekom stabilnog leta - krstarenja i ako je moguće prilikom polijetanja.

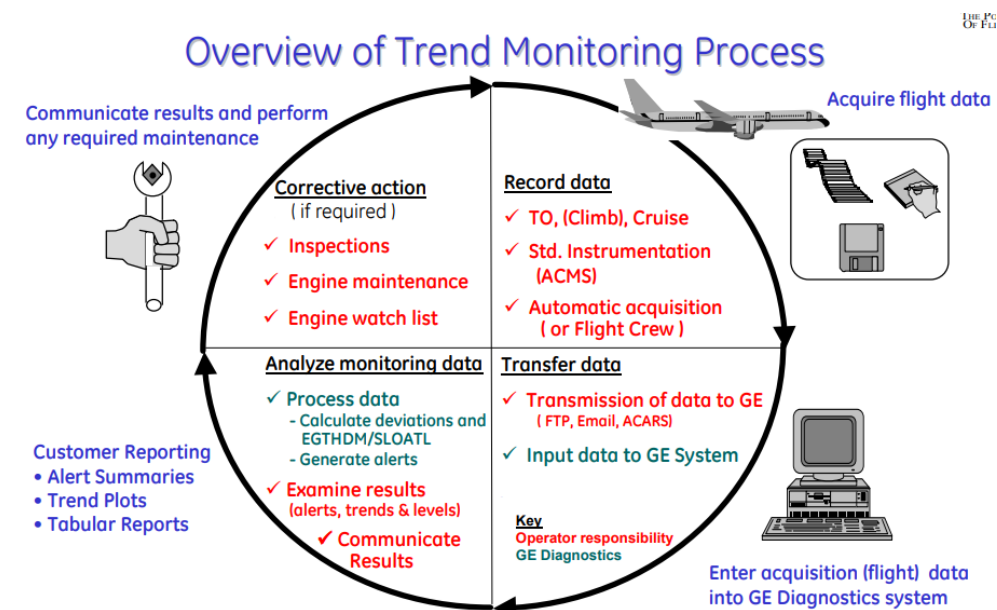
Očekivane prednosti praćenja su:

- Produžuje se životni vijek motora,
- Smanjena potrošnja goriva,
- Smanjeni troškovi održavanja,
- Smanjeni su troškovi kvarova ili neplaniranog prizemljenja zrakoplova.

Svaki operator odgovoran je za nadzor motora. Potrebno je uspostaviti učinkovit proces praćenja stanja motora koji je prikazan na slici 10 na primjeru sustava za uporabu ECTM na motorima tvrtke GE (*General Electric*).

Proces svakog operatora se generalno sastoji od 4 dijela utvrđivanja stanja.

Podaci koji se prate najprije se moraju zabilježiti. To se postiže snimanjem podataka u definiranim trenutcima kao što su polijetanje i krstarenje, uz pomoć standardizirane opreme za prikupljanje podataka. Prikupljeni podaci se zatim moraju prenijeti u sustav za dijagnostiku stanja, a to je moguće putem mail-a, ACARS-om ili prijenosom kompletnog *file*-a na računalo – FTP. Nakon toga moguće je analizirati prikupljene podatke gdje se analiziraju promjene vrijednosti ili upozorenja, te se nakon analize donose rezultati i zaključci na temelju čega je moguće obavijestiti operatora ili mehaničare o potrebnim korektivnim mjerama prije nego li te promjene počnu utjecati na siguran rad. Ukoliko su korektivne mjere potrebne, radi se inspekcija stanja i održavanje motora.



Slika 10. Pregled procesa praćenja trenda motora [37]

U prvim fazama primjene ECTM parametri za analizu stanja motora su se očitavali s instrumenata i bilježili na obrasce koji su se kasnije u tehničkoj službi operatora obrađivali. U sadašnje vrijeme ti podatci se automatski snimaju, pohranjuju u memoriju unutar sustava zrakoplova i transferiraju u baze za obradu podataka na zemlji, kako je vidljivo na slici 10.

Podaci se mogu snimati tijekom rada motora na zemlji, pri polijetanju i krstarenju, ali u svim ostalim fazama leta.

Podaci motora koji se najčešće obavezno snimaju su:

- Identifikacija ulaznih podataka – identifikacija zrakoplova, datum vrijeme,
- Radni uvjeti zrakoplova - visina, Mach-ov broj, OAT (eng. *Outside Air Temperature*) ili TAT (eng. *Total Air Temperature*),

- Radni parametri motora - N1, N2, EGT, protok goriva, vibracije, tlakovi i temperature radnog medija (zrak, ispušni plinovi) u pojedinim pozicijama, temperatura i tlak ulja.

Podaci koji se prate moraju se prikupljati u stabilnim radnim uvjetima, jer je dobra kvaliteta prikupljenih podataka osnova za pravilno i učinkovito tumačenje trenda radnih parametara motora.

Zbog toga je potrebno zrakoplov stabilizirati najmanje 5 minuta tijekom krstarenja prije početka snimanja podataka čime se postiže toplinska stabilizacija motora i normalizacija vrijednosti, a još je potrebno minimizirati varijacije brzine ventilatora N1 na način da nema podešavanja potiska tijekom snimanja podataka.

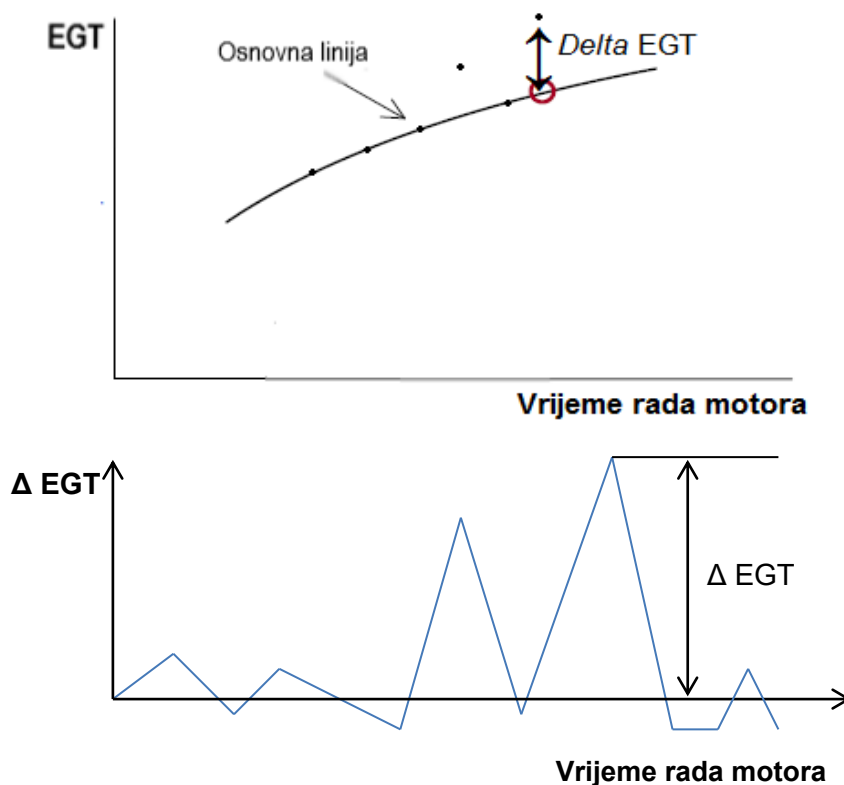
Podaci prikupljeni tijekom krstarenja za svaki motor uspoređuju se s bazom podataka koju je postavio proizvođač kroz rezultate koje je dobio tijekom testnih letova i uz pomoć podataka koji su prikupljeni od drugih korisnika [39].

9. Procjena performansi i analiza tehničkog stanja motora

9.1. Način utvrđivanja degradacije parametara

Procjena performansi motora može se napraviti mjerenjem i analizom trenda prikupljenih podataka za neke od parametara motora. To je proces kojim se snimljeni podaci o motoru izgladuju i zatim uspoređuju s podacima osnovnog modela motora definiranog od strane proizvođača, a također se uspoređuju s podacima izmjerenima za motor tijekom vremena koji su pohranjeni u bazi podataka.

Izmjerena vrijednost uspoređuje sa definiranim vrijednostima osnovne linije koja predstavlja referencu za očekivane vrijednosti ili očekivano ponašanje motora. Odstupanje od osnovne linije predstavlja *Delta* vrijednost što je prikazano na slici 11. U obzir se uzimaju radni uvjeti motora u trenutku bilježenja podataka. Vrijednosti koje se bilježe nisu iste za različitu visinu, vanjsku temperaturu ili brzinu. Zbog toga potrebno je najprije denormalizirati vrijednosti kako bi ih mogli uspoređivati, jer bi u protivnom ispravan motor mogao biti prikazan kao neispravan zbog netočnih ulaznih podataka. Denormalizacijom se parametri osnovnog, idealnog modela preračunavaju na uvjete u trenutku snimanja, kako bi se mogli uspoređivati.



Slika 11. Grafički prikaz *delta* vrijednosti na primjeru odstupanja od EGT

Osnovna linija definirana je kao linija izvedena iz određenog broja vrijednosti pojedinog parametra zabilježenih u momentima kada je motor u pouzdano dobrom

stanju. Proračunava se svaki parametar. Kasnija degradacija krivulje parametara ukazat će na promjene stanja motora. Osnovne linije moraju se proračunati u početku uvođenja programa praćenja stanja. Kod novih motora treba vremena za uhodavanje rada motora, pa prve proračunate vrijednosti osnovnih linija mogu biti neprihvatljive. Nakon toga se proces mora ponoviti.

Vrijednost definirane osnovne linije referenca je za čitav vijek motora do inspekcije vruće sekcije (eng. *Hot section Inspection* HSI) odnosno obnove, eng. *overhaul-a* (OH). Ukupna promjena predstavlja vertikalnu razliku između srednje vrijednosti nekoliko uzastopnih *delta* vrijednosti i ranije određene bazne linije. Ona predstavlja iznos degradacije parametara u odgovarajućem periodu rada motora.

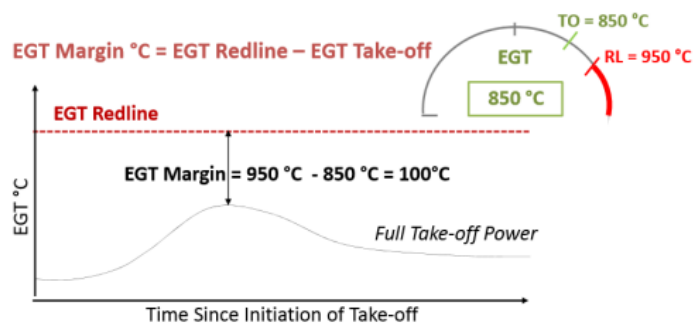
Grafički prikaz je najpogodniji oblik prikaza rezultata jer omogućuje kvalitetnu vizualnu analizu stanja motora. Više *delta* vrijednosti se povezuje linijama što olakšava očitavanje dijagrama. Moguće je imati i odvojeni prikaz manualno snimljenih podataka od onih snimanih automatski kako bi se uočio i reducirao eventualni šum. Podaci se podvrgavaju izgladivanju (eng. *smoothing*) čime se hrapavost krivulje i oštri lomovi krivulje zaglađuju i olakšava se očitavanje tijekom analize [21].

Trend analize prikupljenih podataka mogu ukazati na propadanje modula i predvidjeti zakazivanje dijelova motora što se onda može spriječiti pravovremenim pokretanjem aktivnosti održavanja.

9.2. Promjena EGT

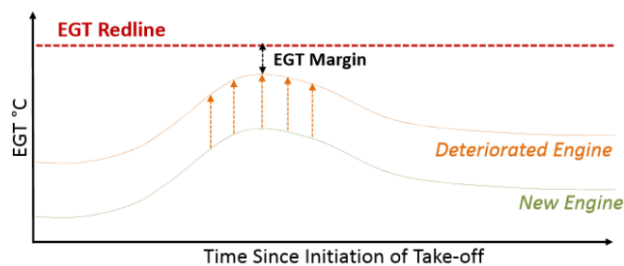
Jedan od važnih parametara za ocjenu stanja mlaznih motora je EGT (eng. *Exhaust Gas Temperature*). Motori su certificirani s temperaturnim ograničenjima koja se primjenjuju putem ograničenja maksimalnog EGT-a pri uzlijetanju, koji se naziva crvenim (eng. *redline*) EGT-om.

EGT margina (EGTM) koja je prikazana na slici 12, razlika je između vršnog EGT-a nastalog tijekom polijetanja i certificiranog EGT-a na crvenoj liniji i to je parametar koji najbolje predstavlja stanje degradacije motora. EGTM je na svom maksimumu vrijednost kada je motor nov ili je tek vraćen sa remonta [39].



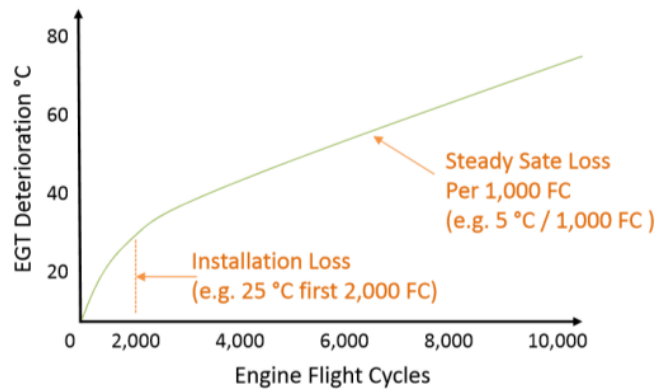
Slika 12. EGT margina [40]

Kako se motor tijekom radnih ciklusa troši, EGT margina će se smanjivati sve dok ne dosegne *redline* EGT ili apsolutnu temperaturnu granicu koja se ne može prekoračiti bez oštećenja motora. Da bi se to spriječilo nadzire se razina EGT margine i prema tim podacima planira pravovremenu obnovu motora. Na slici 13 dan je primjer kako vrijednost EGT margine opada tijekom vremena.



Slika 13. Opadanje EGTM tijekom vremena [40]

Kod novih motora dolazi do značajnog smanjenja EGT margine tijekom razrade motora u prvih 2000 radnih ciklusa za oko 25°C, a nakon toga smanjenje EGT margine je konstantno, kao što je prikazano na slici 14.



Slika 14. Smanjenje EGT margine s radnim ciklusima motora [40]

Smanjenje margine EGT uglavnom je posljedica smanjenih performansi komponenti motora. Kad se EGT margina smanjuje dolazi do povećane potrošnje goriva što rezultira smanjenjem efikasnosti tijekom rada. Na slici 15 prikazan je primjer istrošenih lopatica turbine i kompresora što je jedan od mogućih uzroka smanjena EGT-a.

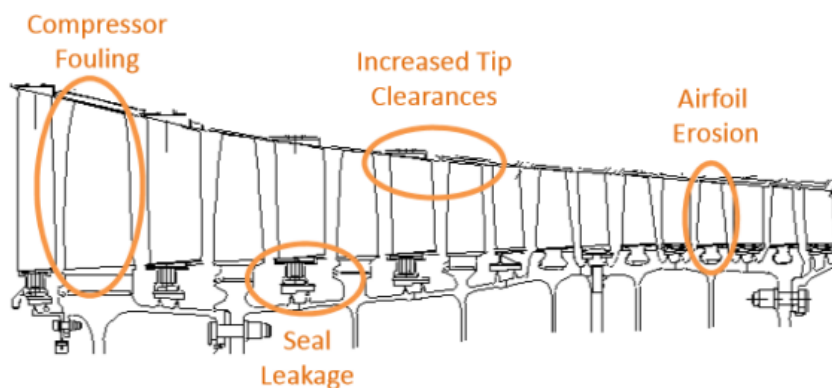


Slika 15. Primjer istrošenih lopatica turbine i kompresora [39]

Kako motori akumuliraju radne cikluse, njihove performanse imaju tendenciju pogoršanja zbog različitih razloga kao što su:

- Nakupljanje prašine i prljavštine na lopaticama ventilatora ili aeroprofilu kompresora,
- Povećanje zazora vrhova na kompresoru ili turbini i zazori brtvi,
- Drugi mehanizmi kao što je erozija aeroprofila, oksidacija vrućeg dijela i povećan protok zraka zbog potrošnje dijelova.

Na slici 16 prikazani su neki od uzroka pogoršanja EGT margine.

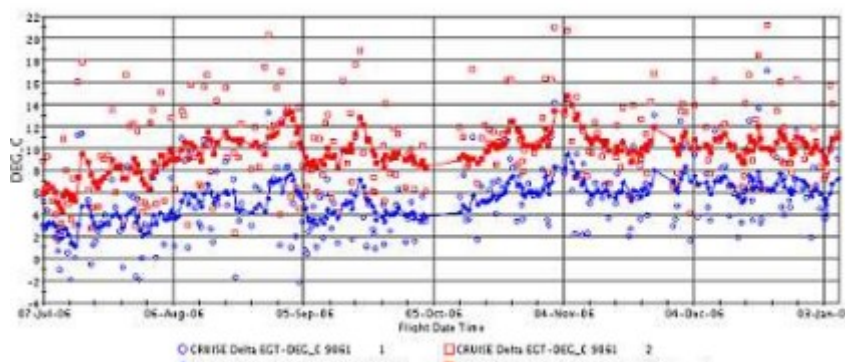


Slika 16. Uzroci pogoršanja EGT margine [40]

Pogoršanje EGT margine tijekom vremena uzrokuje potrebu za povećanjem potiska motora za ostvarivanje jednakog željenog potiska, kraće vrijeme vijeka korištenja motora, smanjenje prosječnog doleta leta zbog veće potrošnje goriva i pogoršanje uvjeta rada komponenti motora[41].

Razlika, tijekom vremena, između izmjerene izvedbe i očekivane izvedbe na temelju osnovnih linija motora je parametar *Delta* i može se koristiti za procjenu stanja motora i dati odgovarajuću dijagnostiku.

Na slici 17 vidljivo je kako se EGT margina mijenja tijekom ciklusa rada za dva motora.

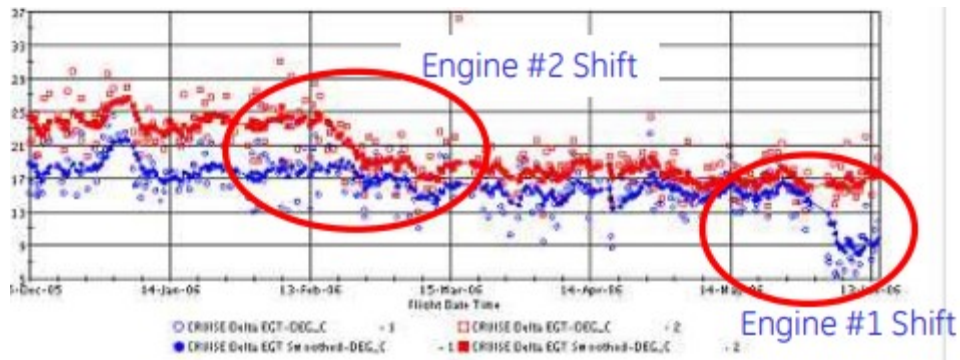


Slika 17. Promjena EGT margine dvaju motora [37]

Plava boja iskazuje vrijednost za prvi motor dok crvena boja iskazuje vrijednosti za drugi motor zrakoplova tipa A320. U ovom primjeru se može vidjeti kako nema bitnih razlika u radu ova dva motora i da je trend uredan. Vrijednosti se mogu razlikovati i ne moraju biti iste za oba motora. Jedan od razloga može biti da jedan od motora ima više radnih ciklusa od drugog odnosno da se duže koristi, pa je iz tog razloga istrošeniji.

Na primjeru prikazanom na slici 18 vidljivo je kako se EGT mijenja tijekom vremena. U prvom dijelu praćenja rada motora, zabilježeno je kako je motor broj 2 imao pad vrijednosti, a do tog perioda vrijednosti za oba motora su bile približno iste. Nakon određenog perioda zabilježen je i značajan pad vrijednosti za motor broj 1

nakon čega je potrebno ispitati razlog i napraviti provjeru. Trendovi divergencije za motore na slici trebale bi biti zrcalne slike jedno drugom.

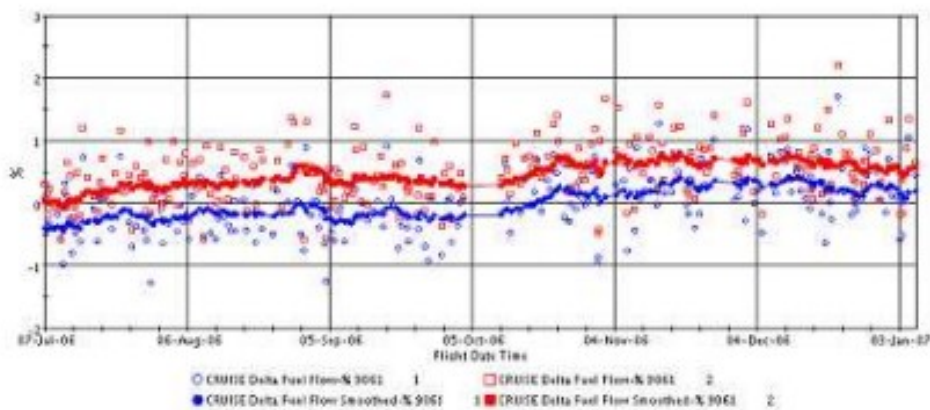


Slika 18. Promjena EGT margine dvaju motora [37]

Potrošnja goriva

Potrošnja goriva izravno utječe na izgled EGT margine. Osim što EGT margina opada sa većim brojem ciklusa motora, odnosno starenjem motora, na nju utječe i smanjenje učinkovitosti motora. Ukoliko je za isti potisak potrebna veća snaga, posljedično motor troši više goriva. Specifična potrošnja goriva po potisku (*eng. Thrust Specific Fuel Consumption, TSFC*) govori o efikasnosti motora, odnosno što je manja vrijednost tog parametra, motor je efikasniji tj. što je vrijednost tog parametra veća to je motor manje efikasnosti. Dakle odnos TSFC i efikasnosti motora je obrnuto proporcionalan te o njemu ovisi rast ili pad EGT margine. Odnosno, ukoliko potrošnja goriva raste EGT mora rasti, a ukoliko potrošnja pada, EGT mora padati [37].

Na primjeru danom na slici 19 plava boja iskazuje vrijednosti za prvi motor dok crvena boja iskazuje vrijednosti za drugi motor. Vidljivo je da je protokomjer goriva tijekom perioda sličan za oba motora zrakoplova tipa A320 i da nema velikih oscilacija u potrošnji.

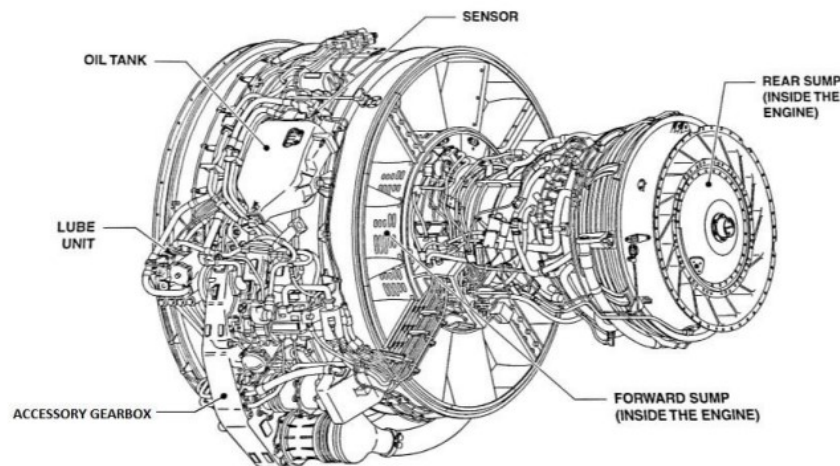


Slika 19. Potrošnja/protok goriva dvaju motora [37]

Tlak i potrošnja ulja

Ulje je važan dio cjelokupnog sustava mlaznog motora jer služi pojedinim dijelovima za podmazivanje, hlađenje, prikuplja metalne čestice - produkte trošenja tijekom vremena te štiti od korozije. Uljni sistem prikazan je na slici 20.

Hlađenje i podmazivanje je jedno od najvažnijih aspekata rada svakog motora, posebno kada su temperature i brzine vrtnje osovina velike [39].

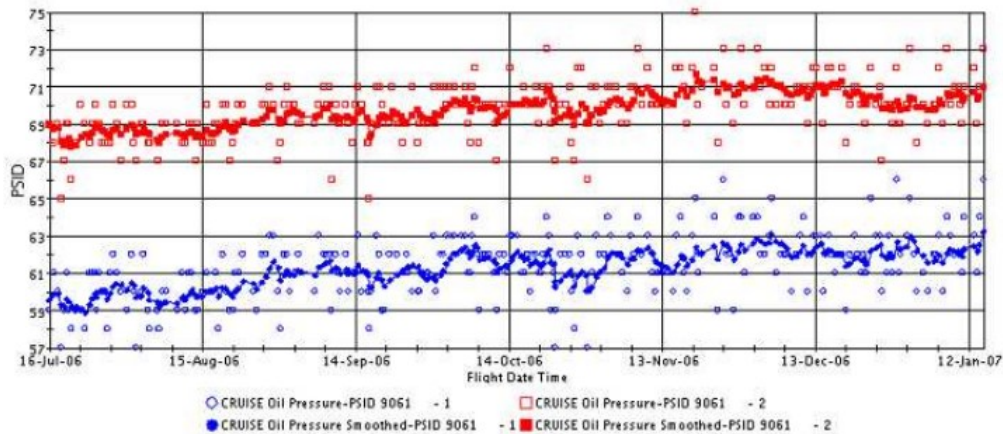


Slika 20. Uljni sistem CFM motora [39]

Trend bi se trebao ispitivati tijekom nekoliko tjedana kako bi se otkrio potencijalni pomak tražeći kratkotrajnu i dugoročnu promjenu u trendu. Praćenjem se može uvidjeti ranija detekcija potencijalnih kvarova, pregrijavanje, promjena tlaka koja može ukazivati na začepjenost mlaznice ulja, rano otkrivanje začepjenosti komponenti sustava za podmazivanje i onečišćenje ulja.

Pomaci u praćenju veći od 10 psi trebali bi biti sumnjivi zbog pogreške sustava indikacije. Ukoliko su pomaci u rasponu od 3-5 psi to može ukazivati na začepjenje mlaznica ulja.

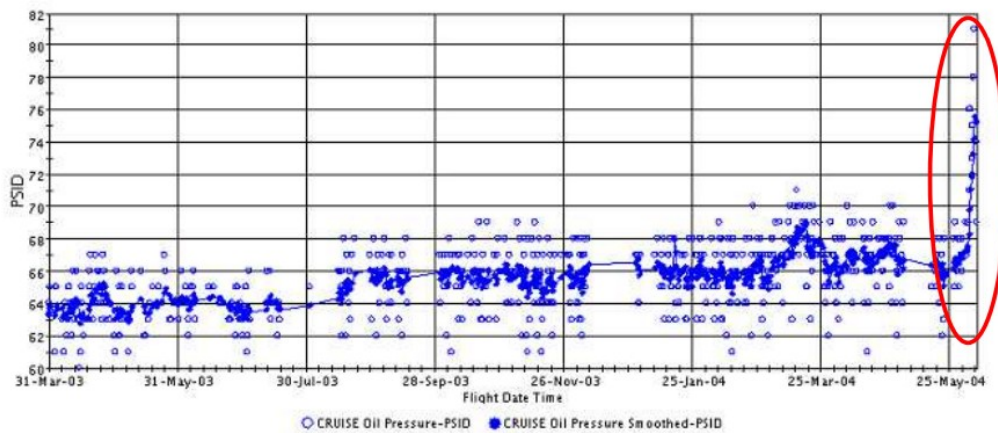
Promjene tlaka ulja se moraju uspoređivati sa temperaturom ulja. Ukoliko temperatura ulja pada tada tlak raste, dok u obrnutom slučaju kada temperatura raste, tlak ulja treba padati.



Slika 21. Tlak ulja za dva motora [37]

Na primjeru prikazanom na slici 21 plava boja iskazuje vrijednosti za prvi motor dok crvena boja iskazuje vrijednosti za drugi motor. Vidljivo je kako vrijednosti prvog motora za iste radne uvjete imaju veće promjene tijekom promatranog vremena što može ukazivati na začepljenost mlaznica ulja jer je promjena tijekom vremena unutar 3-5 psi.

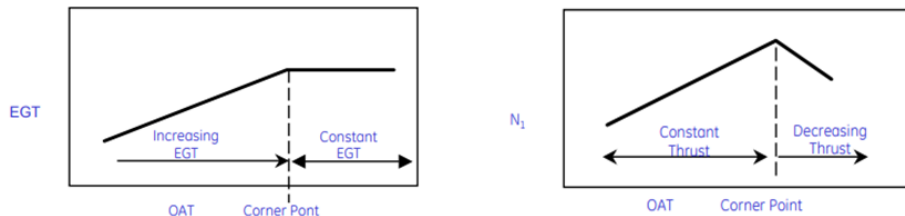
Ukoliko očitane vrijednosti imaju veliko i naglo povećanje to može ukazivati na grešku očitavanja senzora kao što je prikazano na slici 22.



Slika 22. Greška očitavanja senzora tlaka ulja [37]

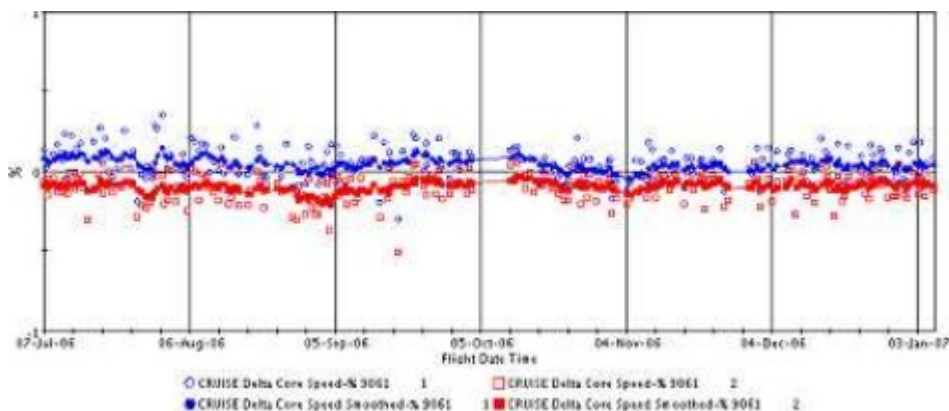
Brzina vrtnje niskotlačnog vratila N1

Na slici 23 vidljivo je kako brzina vrtnje niskotlačnog vratila raste u ovisnosti sa vanjskom temperaturom kako bi se uspio zadržati konstantan potisak. Kada dosegne kutnu točku, a to je najviša temperatura okoline za puni potisak na određenoj nadmorskoj visini, brzina vrtnje vratila N1 i potisak počinju opadati. EGT se povećava s OAT do temperature "kutne točke" i nakon toga ostaje konstantan [37].



Slika 23. Odnosi EGT i brzine vrtnje N1 u odnosu na vanjsku temperaturu [37]

N1 je primarni pokazatelj potiska motora kao alternativa pokazatelja potiska na temelju omjeru totalnih tlakova na izlazu i na ulazu motora (eng. *Engine Pressure Ratio* - EPR).



Slika 24. Prikaz brzine vrtnje dva motora [37]

Na primjeru koji je prikazan na slici 24 plava boja iskazuje vrijednosti za prvi motor dok crvena boja iskazuje vrijednosti za drugi motor. Uočljivo je da je brzina vrtnje tijekom promatranog perioda slična za oba motora zrakoplova tipa A320 i da nema velikih oscilacija brzine N1, odnosno potiska, osim male promjene kod motora broj 2 u kratkom periodu na datum 5. rujna.

Vibracije motora

Vibracije u većoj mjeri predstavljaju problem na zrakoplovima. Moguće su na strukturi zrakoplova, a u značajnijoj mjeri u pogonskim sustavima.

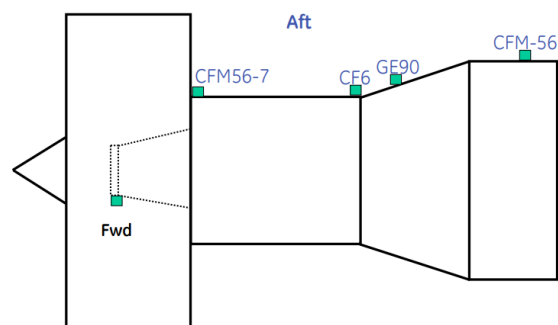
Praćenjem promjena vibracija tijekom vremena može biti koristan element za predviđanje nekih nepravilnosti ili neispravnih dijelova koji utječu na ravnotežu rotirajućih dijelova [21].

Većina modernih mlaznih motora sastoji se od dva ili tri koncentričnih vratila unutar kućišta gdje su smješteni kompresor, ventilator i turbina, a svako vratilo se ne vrti istom brzinom u usporedbi s drugom. Zbog toga dolazi do vibracija koje moraju biti unutar određenih granica. Najosjetljiviji dijelovi na vibracije su na ventilatoru, na prednjem dijelu motora i na niskotlačnoj turbini u stražnjem dijelu, budući da su to dijelovi motora s najvećim promjerom.

Veće vibracije mogu biti uzrokovane neravnotežom jedne od lopatica motora koja utječe na rotaciju, što dovodi do vibracija. Čak i mala neravnoteža može imati utjecaja. Promjer motora i brzina rotacije su veliki, tako da neravnoteža od samo nekoliko grama na jednoj od 24 lopatice motora može rezultirati vibracijama.

Neravnoteža može biti posljedica brojnih čimbenika: čađe, prašine ili samo općeg trošenja lopatica tijekom vremena.

Analiza vibracija provodi se na motorima zrakoplova kako bi se provjerilo jesu li razine vibracija unutar prihvatljivih razina i to se uglavnom radi uz pomoću dvije vrste senzora: tahometara za mjerenje brzine rotacije vratila u okretajima po minuti (*eng. Revolutions per minute* - rpm) i senzora vibracija koji su pričvršćeni na kućište motora. Slika 25 prikazuje položaje senzora [42].



Slika 25. Položaj vibracijskih senzora za različite motore [37]

Prednji senzori se primarno koriste za kontrolu vibracija ventilatora, dok se stražnji primarno koriste za kontrolu vibracija jezgre.

Parametri vibracija dijele se na primarne i sekundarne.

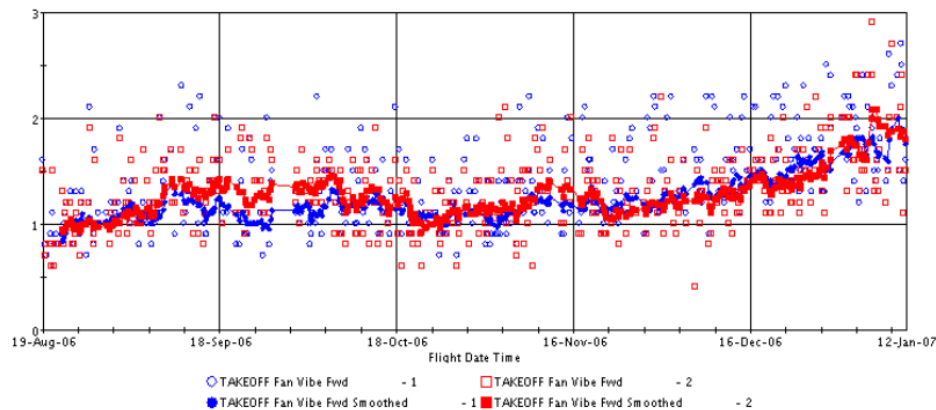
Primarni parametri su:

- ZVB1F - Vibracije ventilatora praćene prednjim senzorom tijekom polijetanja i krstarenja;
- ZVB2R - Vibracije jezgre praćenje stražnjim senzorom tijekom polijetanja i krstarenja.

Sekundarni parametri su:

- ZVB1R - Vibracije ventilatora praćene stražnjim senzorom tijekom uzlijetanja i krstarenja;
- ZVB2F – Vibracije jezgre praćene prednjim senzorom tijekom polijetanja i krstarenja.

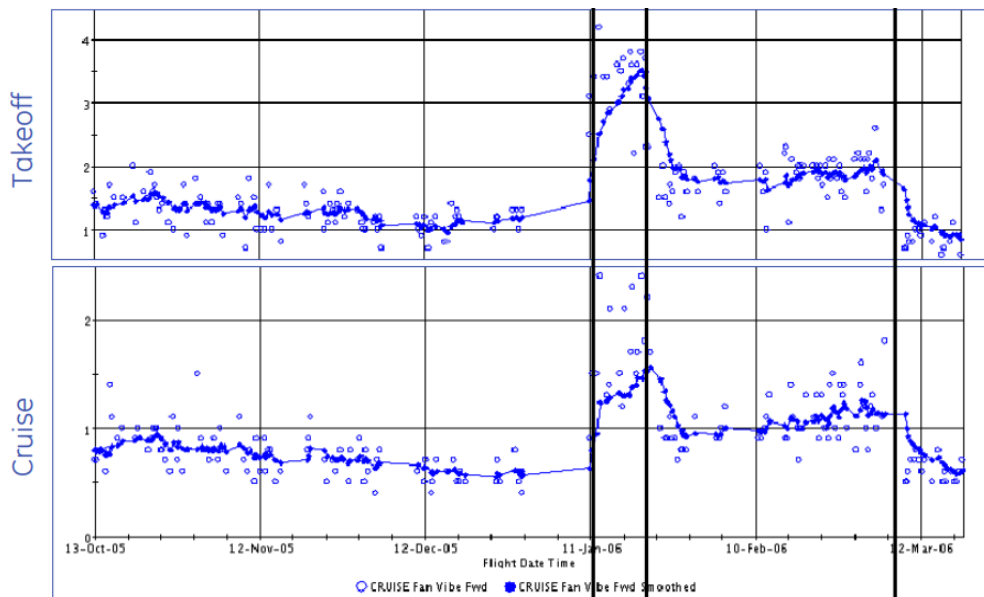
Ove sekundarne indikacije korisne su za provjeru pomaka vrijednosti na primarnom senzoru, ali se obično ne smiju koristiti za usporedbu „jedan“ na „jedan“ zbog različite osjetljivosti senzora vibracija [37].



Slika 26. ZVB1F-trend pri polijetanju [37]

Magnituda vibracija trebala bi biti veća pri polijetanju nego na krstarenju što je prikazano na slici 26. Ako su dostupni sekundarni podaci potrebno je ispitati razlike u trendu vibracija dijela kojeg ispitujemo za očitane vrijednosti prednjeg i stražnjeg senzora. Ovisno o vrsti zrakoplova, podaci o vibracijama mogu imati raspršene indikacije u trendu. Ova raspršenost očitanih podataka otežava tumačenje trendova [37].

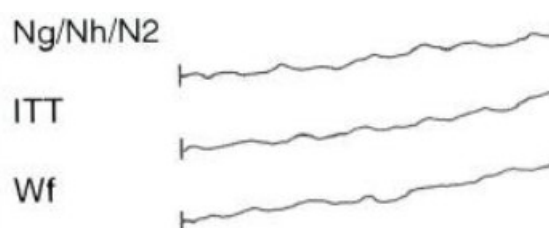
Na primjeru prikazanom na slici 27 prikazane su očitane vrijednosti vibracija za jedan motor tijekom polijetanja i krstarenja u periodu od 6 mjeseci.



Slika 27. Vibracije motora u različitim fazama leta u periodu od 6 mjeseci [37]

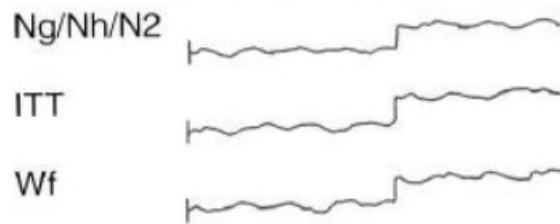
Vidljivo je kako su vrijednosti u jednom trenutku naglo porasle. Problem velikih vibracija se u prvom dijelu nakon naglog povećanja smanjio podmazivanjem ventilatora gdje je vidljiv pad vibracija, dok se dodatno smanjenje vibracija postiglo u trećem dijelu kada je obavljen postupak balansiranja ventilatora (*eng. trim balance*).

U praksi analiza trenda se provodi usporedbom više očitanih vrijednosti parametara koji se prate. Većina degradacija je postepena i moguće je pratiti promjene, a može biti postupna ili trenutna, osim u slučaju ako se radi o udaru stranog objekta u motor ili ukoliko dođe do iznenadnog curenja i slično. Promjena temperature unutar turbine je značajan parametar koji reagira na sve vrste degradacije i ukazuje na potencijalni problem koji se može razjasniti uz pomoć drugih parametara motora kao naprimjer broj okretaja visokotlačne turbine. Ukoliko temperatura unutar turbine ima promjenu od 10-15 °C to je znak da je potrebno istražiti razlog porasta temperature, dok promjena iznad 25 °C dovodi do ozbiljnog oštećenja motora. Također ukoliko je promjena brzine okretanja vratila od 0.75% potrebno je istražiti uzrok što je prije moguće dok promjena iznad 1% predstavlja opasnost od većeg kvara i potrebno je odmah istražiti uzrok. Promjena samo jednog parametra kao i svih parametara na jednom motoru tijekom rada može ukazivati na grešku senzora ili instrumenta za mjerenje [43].



Slika 28. Usporedna analiza više parametara [43]

Na primjeru prikazanom na slici 28 vidljivo je kako brzina vrtnje vratila turbine, temperatura unutar turbine i potrošnja goriva postepeno rastu što može ukazivati na mogući uzrok problema zaprljanog kompresora ili erozije kompresora.



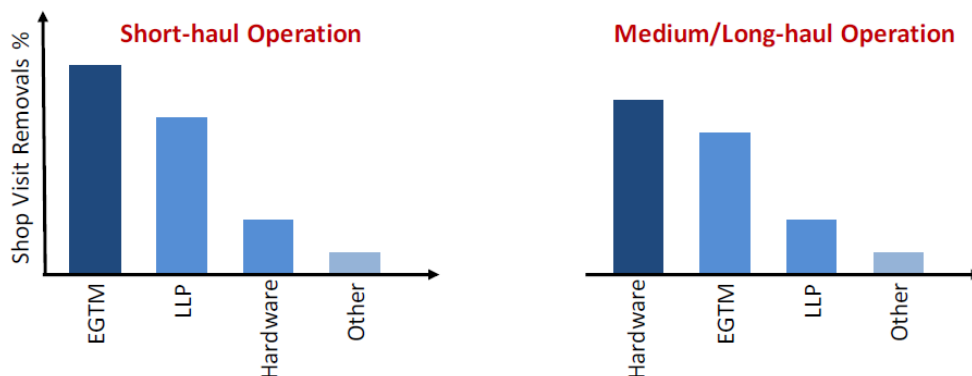
Slika 29. Stepenasto povećanje vrijednosti parametara [43]

Na primjeru prikazanom na slici 29 uočava se stepenasto povećanje vrijednosti vrtnje vratila turbine, temperature i potrošnje goriva što može ukazivati na mogući uzrok koji može biti strani objekt u kompresoru ili je protupumpažni ventil ostao zaglavljjen [43].

10. Utjecaj praćenja trenda radnih parametara na sigurnost i ekonomičnost eksploatacije

Troškovi održavanja motora mogu biti kategorizirani u više različitih skupina, a prema literaturi *Basics of Aircraft Maintenance Programs for Financiers* neke od njih su:

1. Troškovi rada i materijala su bazični troškovi prema kojima se procjenjuje ekonomski aspekt održavanja;
2. Planirani/Rutinski troškovi – troškovi koji nastaju u redovnim, unaprijed planiranim zadacima održavanja koji su zahtjev MPD-a;
3. Neplanirani/Nerutinski troškovi – troškovi koji nastaju u neplaniranim popravcima ili zamjenom oštećenih i nefunkcionalnih dijelova; ovaj tip troškova je najčešći uzrok povećanja troškova održavanja do kojeg dolazi starenjem zrakoplova;
4. Kalendarski troškovi – tip troškova koji ne ovise direktno o korištenju zrakoplova, a obično se procjenjuju na godišnjoj bazi; najveći kalendarski troškovi su oni povezani sa *overhaulom*, odnosno održavanjem koje podrazumijeva kompletno rastavljanje komponente (primjerice motora) u svrhu detaljnog pregleda, čišćenja i/ili popravka i zatim ponovnog sastavljanja.
5. Troškovi prema broju ciklusa – ciklusom leta smatra se jedan let zrakoplova, neovisno o duljini leta. Sa strane održavanja to su fiksni troškovi za neke dijelove kao što su kotači i kočnice te za dijelove motora ograničenog životnog vijeka (eng. *Life-Limited Parts* – LLP) što su primjerice diskovi, brtve, vratila, jer se definiraju prema broju ciklusa letenja. Kad dosegnu određeni broj ciklusa letenja, LLP se moraju zamijeniti što se kod zrakoplova koji lete na dugim rutama događa značajno rjeđe nego kod zrakoplova koji lete na kratkim rutama, pa su time troškovi ciklusa letenja veći za zrakoplove koji lete na kratkim rutama kao što je prikazano na primjeru slike 30.



Slika 30. Odnos troškova servisa LLP dugolinijskih i kratkolinijskih letova [11]

6. Troškovi prema broju sati naleta – sa strane održavanja to su varijabilni troškovi koji su proporcionalni duljini leta. Isti zrakoplov koji operira na različitim duljinama leta zahtjeva različite razine održavanja ovisno o ciklusima leta i duljini leta [11].

Održavanje motora predstavlja najveći udio u direktnim troškovima održavanja zrakoplova. Ovisno o modelu motora i karakteristikama njegova dizajna, tehničkom stanju i opsegu potrebnih aktivnosti održavanja, radioničko održavanje motora može koštati između 3 milijuna \$ i 12 milijuna \$ [11].

Sama implementacija ECTM programa zahtijeva prikupljanje podataka tijekom leta, razvoj matematičkih modela koji omogućuju normalizaciju podataka i usporedbu podataka sa predviđenim vrijednostima, analizu podataka kako bi se uočile anomalije, odnosno značajno ulaganje u računalnu opremu i razvoj odgovarajućih softvera za trend analize podataka.

Primjena ECTM-a može smanjiti troškove održavanja na način da produljuje vrijeme između *overhaulta*, uz očuvanu pouzdanost motora. ECTM također preventira troškove koji bi bili posljedica neplaniranih zakazivanja ili oštećenja motora [45].

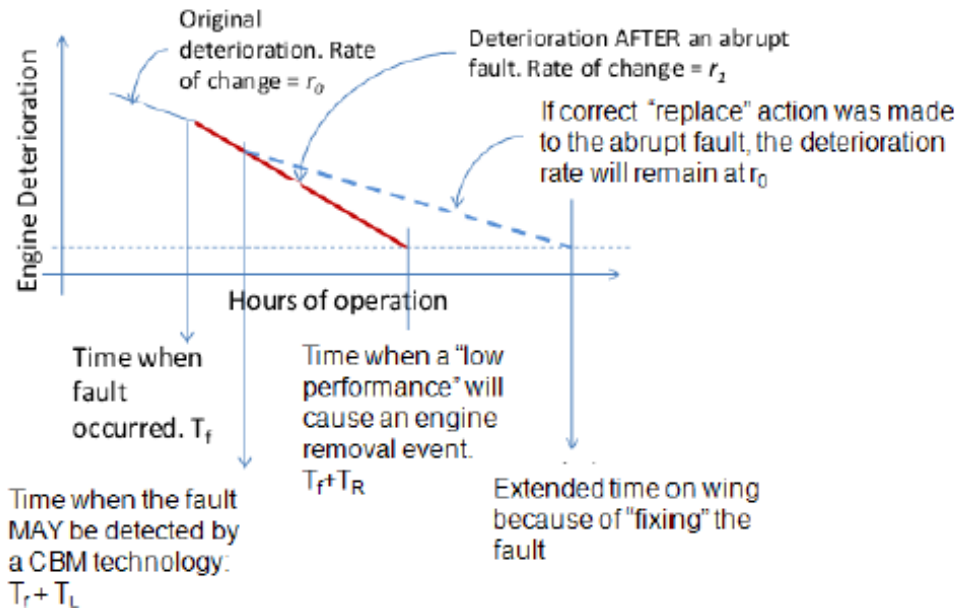
U posljednjih desetak godina ostvaren je značajan napredak u dizajnu, razvoju i primjeni rješenja koja omogućuju kontinuirano praćenje rada motora, primjerice razvoj novih senzora, točnijih algoritama i praćenja performansi za veći broj komponenti motora. Kako bi ta rješenja zaživjela u praksi, moraju se integrirati u postojeće motore i procese njihovog održavanja, pri čemu se tehnički faktori moraju balansirati sa ekonomskim i operativnim dobrobitima koja ta rješenja donose, tj. mora se napraviti analiza troškova i dobiti (eng. *Cost-Benefit Analysis* – CBA) [46].

Glavni ciljevi CBM-a su:

1. Smanjiti opterećenje zaposlenika u održavanju;
2. Povećati raspoloživost zrakoplova;
3. Povećati sigurnost;
4. Smanjiti operativne troškove i troškove podrške za zrakoplov [46].

Navedeni ciljevi obuhvaćaju financijske i nefinancijske dobrobiti CBM-a. Iako su nefinancijske dobrobiti veoma važne u pogledu sigurnosti, teško im je dodijeliti konkretnu novčanu vrijednost, dok se smanjenje operativnih troškova i troškova rada može direktno financijski mjeriti.

Na slici 31 prikazan je ukupni utjecaj neželjenih efekata koji su posljedica nemogućnosti da se detektira početna greška u radu motora, kad se ne koristi ECTM.



Slika 31. Utjecaj neotkrivenog iznenadnog kvara [46]

Iznenadni nagli pad stope postupnog pada performansi motora dogodio se u trenutku T_f . Do toga je došlo zbog greške u jednom od LRU. Stopa degradacije narasla je sa r_0 na r_1 , odnosno degradacija se događa ubrzano. S obzirom da je motor u upotrebi, njegov je rad neefikasan nakon što se greška dogodila što dovodi do skoka u specifičnoj potrošnji goriva TSFC i u konačnici do potrebe za neplaniranim održavanjem motora, odnosno stvaraju se nerutinski troškovi kako bi se problem riješio.

U drugom scenariju, uz korištenje CBM tehnologije, greška se uočava ranije, odnosno nakon kratkog perioda latencije, T_L . Time su ostvarene sljedeće dobrobiti:

- Nakon zamjene LRU, motor nastavlja raditi uz svoju inicijalnu stopu postupne degradacije r_0 što rezultira produljenjem operativnog vremena zrakoplova i smanjuje troškove održavanja;
- nema promjene u TSFC-u, dakle niti povećanja troškova za gorivo, odnosno ostvarena je ušteda u potrošnji goriva;
- spriječeno je sekundarno oštećenje drugih dijelova motora ako se inicijalna greška LRU-a uoči brzo;
- održavanje se odvija prema planu, odnosno održavanje se može isplanirati prije nego što se zrakoplov mora izbaciti iz upotrebe čime je povećana dostupnost zrakoplova i izbjegavaju se dodatni troškovi (primjerice trošak prekovremenih sati zaposlenika kako bi se zrakoplov što prije vratio u promet nakon neplaniranog održavanja) [46].

Također, učinkovitost CBM-a, odnosno praćenja radnih parametara je tim veća što se više parametara može istovremeno pratiti što je detaljnije objašnjeno kroz usporedbu dvaju ECTM modela.

Model 1 ima senzore i algoritme potrebne za prikupljanje i analizu podataka o česticama metala u ulju (eng. *Oil Debris Monitoring – ODM*). Model 2 osim ODM senzora ima i sustav za praćenje vibracija, tj. akcelerometre i potrebne hardvere i softvere koji daju indikatore stanja za naprednu mehaničku dijagnostiku. U usporedbi sa čip detektorima, oba ECTM modela daju značajne dobrobiti u pogledu smanjenja vremena potrebnog za istragu i odbacivanje netočnih očitavanja čip detektora. Pružaju indicacije prema kojima se može planirati održavanje umjesto neplaniranih, nerutinskih aktivnosti održavanja i sukladno tome povećava se dostupnost zrakoplova te se minimiziraju sekundarna oštećenja koja se mogu dogoditi ukoliko se greška ili kvar ne uoči na vrijeme.

Nadalje, kad se model 1 i model 2 međusobno usporede, model 2 omogućuje značajno bržu pouzdanu detekciju greške/kvara u odnosu na model 1, tj. ranije će dati upozorenje od modela 1. Uspješnost modela 2 bazirana je na tome što očitavanje vibracija sa relativno malom količinom čestica metala daje veću pouzdanost već u početku nastajanja greške, dok je kod modela 1 potrebno nakupljanje puno veće količine čestica metala na detektoru, da bi se ustanovila razlika između normalnog stanja i nepravilnog stanja/greške. Točnije, model 2 omogućit će planirano održavanje u 95% slučajeva, dok će model 1 dati pravovremeno upozorenje u tek 50% slučajeva. Da bi se kvantificirala vrijednost pravovremenog upozorenja koje omogućuje planirano umjesto neplaniranog održavanja, može se pomnožiti prosječno vrijeme sati letenja koje je zrakoplov proveo na zemlji zbog neplaniranog održavanja i trošak letenja po satu. Usporedi li se ta vrijednost s ulaganjima potrebnima za razvoj, instalaciju i održavanje, model 2 će i dalje opravdati potrebna ulaganja jer dovodi do značajnog smanjenja troškova održavanja i prevencije gubitka operativnosti zrakoplova zbog koje se smanjuju prihodi [46].

11. Zaključak

Zrakoplovni motor jedan je od najzahtjevnijih sustava na cijelom zrakoplovu, a njegovo održavanje predstavlja najveći udio u direktnim troškovima održavanja zrakoplova. Održavanje zrakoplova provodi se prema međunarodnim normama i propisima, a današnji zrakoplovi održavaju se prema MSG-3 logici čime se izbjegavaju nepotrebni radni zadaci, a uz to se postiže veća učinkovitost.

Kroz godine je MSG-3 koncept značajno unaprijeđen i dodane su metodologije za bolje pokrivanje svih mogućih poteškoća u radu motora, a napretkom tehnologije programi održavanja bazirani na MSG konceptu i dalje će se unaprijeđivati.

BITE sustav pomoću kojeg se nadzire ispravno funkcioniranje zrakoplovnih sustava ključan je za pravovremeno uočavanje bilo kakvih neispravnosti i značajno olakšava postupke održavanja, jer u slučaju da pojedini dio na zrakoplovu ne ispunjava svoju funkciju, sustav izdaje upozorenje. FADEC sustav koji kontrolira rad motora na temelju brojnih podataka koje konstantno prima i obrađuje, uvelike je doprinio postizanju optimalne učinkovitosti rada motora. Uz pomoć takvih složenih sustava moguće je kontinuirano pratiti tehničko stanje i radne parametre motora, a prikupljeni se podaci analiziraju u trend analizama. Prilikom praćenja parametara izmjerene vrijednosti se uspoređuju sa definiranim vrijednostima, a svako odstupanje predstavlja delta vrijednost. Promjena EGT jedan je od parametara koji najbolje prikazuje stanje motora. Najčešće se međusobno uspoređuje 3 ili više parametara kako bi se došlo do zaključka koji je uzrok nestandardnih vrijednosti ukoliko one postoje.

Unatoč tome što su za primjenu ECTM-a potrebne značajne početne investicije kako bi se osigurala potrebna oprema i razvili programi za obradu velike količine podataka koji se prikupljaju, uštede koje proizlaze iz primjene ECTM-a, tj. CBM-a su značajne i opravdavaju inicijalna ulaganja. Uštede se postižu pravovremenim uočavanjem anomalija zbog čega se održavanje može planirati i provesti brže i efikasnije, ne dolazi do sekundarnih oštećenja drugih dijelova motora, produljuje se vrijeme između overhuala i općenito se povećava iskoristivost zrakoplova te se na taj način izbjegavaju dodatni troškovi čiji uzrok može biti neplanirano prizemljenje zrakoplova. Također, osobito važan aspekt CBM-a je značajno povećanje sigurnosti eksploatacije.

Literatura

[1] Domitrović A. Zrakoplovni propisi vezani uz eksploataciju i održavanje zrakoplova. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu. Fakultet prometnih znanosti. Autorizirana predavanja; 2019/2020

[2] Skybrary. Preuzeto sa:

[European Union Aviation Safety Agency \(EASA\) | SKYbrary Aviation Safety](#)
[Pristupljeno: travanj 2022.].

[3] Eur-Lex - Pristup zakonodavstvu Europske unije. Preuzeto sa:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:02014R1321-20190305&from=EN>

[Pristupljeno: travanj 2022.].

[4] Eur-Lex – Pristup zakonodavstvu Europske unije. Preuzeto sa:

<https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2014/1321/oj/hrv>

[Pristupljeno: travanj 2022.].

[5] European Union Aviation Safety Agency. Preuzeto sa:

<https://www.easa.europa.eu/downloads/95788/en>

[Pristupljeno: svibanj 2022.].

[6] European Union Aviation Safety Agency. Preuzeto sa:

<https://www.easa.europa.eu/regulations>

[Pristupljeno: svibanj 2022.].

[7] European Union Aviation Safety Agency .Easy Access Rules for Continuing Airworthiness (Regulation (EU) No 1321/2014). Preuzeto sa:

<https://www.easa.europa.eu/downloads/95788/en>

[Pristupljeno: svibanj 2022.].

[8] Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture. Preuzeto sa:

<https://mmpi.gov.hr/promet/zracni-promet-125/propisi-8438/8438>

[Pristupljeno: svibanj 2022.].

[9] Boeing.com - Maintenance program Enhancements. Preuzeto sa:

https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_05_1.html

[Pristupljeno: lipanj 2022.].

[10] Skybrary. Preuzeto sa:

<https://skybrary.aero/articles/maintenance-steering-group-3-msg-3>

[Pristupljeno: lipanj 2022.].

[11] Ackert S.P. Basics of Aircraft Maintenance Programs for Financiers. Preuzeto sa:

http://aircraftmonitor.com/uploads/1/5/9/9/15993320/basics_of_aircraft_maintenance_programs_for_financiers_v1.pdf

[Pristupljeno: lipanj 2022.].

[12] Sofema Aviation Services. Preuzeto sa:

<https://sassofia.com/blog/notes-on-the-evolution-of-msg-3-maintenance-steering-group-logic-3/>

[Pristupljeno: lipanj 2022.].

[13] Domitrović A. Program održavanja. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu. Fakultet prometnih znanosti. Autorizirana predavanja 2019/2020.

[14] Stepanić M. Turbo-ventilatorski motor s reduktorom. Diplomski rad. Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje. Sveučilište u Zagrebu, 2012.

[15] Skybrary. Preuzeto sa:

<https://skybrary.aero/articles/turbojet-engine>

[Pristupljeno: lipanj 2022.].

[16] Domitrović A.: Zrakoplovni mlazni motori I. Dio, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2008.

[17] Flight ops Seminar CFM56-5A & 5B , September 2005.

https://www.smartcockpit.com/docs/CFM_Flight_Ops_Support_A320.pdf

[Pristupljeno: lipanj 2022.]

[18] Aviation training services, CFM56, ATA70

[19] The technology behind the CFM56-5B Turbofan Engine. Preuzeto sa:

<https://web.archive.org/web/20100530091509/http://www.cfm56.com/products/cfm56-5b/cfm56-5b-technology>

[Pristupljeno: lipanj 2022.]

[20] Jurjević I. Utjecaj održavanja na performanse zrakoplovnog mlaznog motora. Diplomski rad. Zagreb, Fakultet prometnih znanosti. Sveučilište u Zagrebu, 2018.

[21] Bazijanac E. Tehnička eksploatacija i održavanje zrakoplova. Fakultet prometnih znanosti. Zagreb, 2007.

[22] Skybrary. Preuzeto sa:

[s://skybrary.aero/articles/line-replaceable-unit](https://skybrary.aero/articles/line-replaceable-unit)

[Pristupljeno: lipanj 2022.].

[23] Ellis GF. Distributed built-in test equipment system for digital avionics. Preuzeto sa:

<https://patents.google.com/patent/US5184312A/en>

[Pristupljeno: lipanj 2022.].

[24] Aslin MJ, Patton GJ. Central maintenance computer system and fault data handling method. Preuzeto sa:

<https://patents.google.com/patent/US4943919A/en>

[Pristupljeno: lipanj 2022.].

[25] Training Manual CFM56-5B, Fault detection & annunciation, November 2002.

[26] Part 66 Virtual School. Preuzeto sa:

<http://part66school.blogspot.com/2012/07/module-5-central-management-system.html>

[Pristupljeno: lipanj 2022.].

[27] Virovac D. Sustav održavanja motora CFM-56-5-A. Diplomski rad. Zagreb, Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu, 2002.

[28] Yanlei G, Yanpei Z. Science direct: Airworthiness Management of CFM56 Products in FAA and EASA. Preuzeto sa:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811027536>

[Pristupljeno: lipanj 2022.].

[29] Bae System. Preuzeto sa:

<https://www.baesystems.com/en-us/definition/what-is-fadec>

[Pristupljeno: lipanj 2022.].

[30] Electronicsforu.com, Sensors that add strenght to Aviation and Aerospace, September 2016.

<https://www.electronicsforu.com/market-verticals/sensors-strength-aviation-aerospace>

[Pristupljeno: lipanj 2022.]

[31] Skybrary. Preuzeto sa:

<https://skybrary.aero/articles/full-authority-digital-engine-control-fadec>

[Pristupljeno: lipanj 2022.].

[32] Wikipedia. Preuzeto sa:

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

[Pristupljeno: lipanj 2022.].

[33] Training manual CFM56-5A Engine Systems, April 2000.

[34] Ficarella A. Engine Controls, Universita del Salento, Facolta DI Ingegneria Industriale, Brindisi.

[35] Wikipedia. Preuzeto sa:

https://en.wikipedia.org/wiki/Flight_management_system

[Pristupljeno: lipanj 2022.].

[36] Wikipedia. Preuzeto sa:

<https://hr.wikipedia.org/wiki/Aktuator>

[Pristupljeno: lipanj 2022.].

[37] CFM Diagnostics Trend Interpretation Training, Rev. 3, February 2008.

[38] Latitude Technologies. Preuzeto sa:

https://www.latitudetech.com/solutions/engine-trend-monitoring/?qclid=Cj0KCQjw7sz6BRDYARIsAPHzrNLObRf-HNuv7mnTPecjw6Uk9XISp6ATxSnQ4n8o0tx3Mv4GT7K_AGqaAmpkEALw_wcB

[Pristupljeno: lipanj 2022.].

[39] Gomes e Silva JM. Flight Data Tools Applied to Engine Health Monitoring. Tehnico Lisboa, Master thesis, Lisboa, December 2016.

[40] EGT Margin.

<https://img1.wsimg.com/blobby/go/5829f461-3342-4b37-915a-3c84b2028ca3/EGT.pdf>

[Pristupljeno: Lipanj 2022.]

[41] Tülin Yildirim M, Kurt B. Aircraft Gas Turbine Engine Health Monitoring System by Real Flight Data. Hindawi International Journal of Aerospace Engineering Volume 2018, Article ID 9570873, March 2018.

[42] Aerospace Testing International. Preuzeto sa:

<https://www.aerospacetestinginternational.com/features/how-vibration-data-informs-the-maintenance-of-aircraft-engines.html>

[Pristupljeno: lipanj 2022.].

[43] Šegvić M. Engine condition and Trend monitoring, Vježba 3. Prvi dio Osnove ECTM-a. Velika Gorica: Veleučilište Velika Gorica. Autorizirana predavanja; 2017/2018.

[44] Domitrović A. Značaj održavanja u eksploataciji zrakoplova. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu. Fakultet prometnih znanosti. Autorizirana predavanja; 2019/2020.

[45] Čepin M, Briš R. Safety & reliability – theory and applications; CRC Press, 2017. Preuzeto sa:

<https://books.google.hr/books?id=P8nDwAAQBAJ&pg=PT1584&lpg=PT1584&dq=financial+aspect+of+ectm&source=bl&ots=nnAgyrpRT-&sig=ACfU3U2liqcgW7wnXJXDcriAmJNPdEHk6g&hl=hr&sa=X&ved=2ahUKEwjc8cnU9Mr5AhUDzKQKHcsVALEQ6AF6BAgREAM#v=onepage&q=financial%20aspect%20of%20ectm&f=false>

[Pristupljeno: kolovoz 2022.].

[46] Gordon G, Hickenbottom C, Myllaraswamy D. A Cost-Benefit Approach to Evaluating Engine Health monitoring System. Preuzeto sa:

<https://papers.phmsociety.org/index.php/phmconf/article/download/2170/1168>

[Pristupljeno: kolovoz 2022.].

Popis kratica

| | |
|-------|--|
| AL | (Airworthiness Limitations) Dokument u kojem su propisana ograničenja plovidbenosti |
| AMO | (Approved Maintenance Organisation) Ovlaštena organizacija za održavanje |
| ACARS | (Aircraft communication addressing and reporting system) Sustav za automatsko ili ručno slanje i primanje telex poruka i kokpitu |
| BITE | (Built In Test Equipment) Ugrađeni sustav za ispitivanje neispravnosti u radu zrakoplova |
| BPR | (Bypass Ratio) Stupanj obtočnosti |
| CA | (Continuing Airworthines) Kontinuirana plovidbenost |
| CAA | (Civil Aviation Authority) Civilna zrakoplovna vlast |
| CDU | (Control Display Unit) Jedinica za upravljanje |
| CBM | (Condition Based Maintenance) Održavanje prema stanju |
| CFDIU | (Centralized Fault Display System) Centralizirani sustav prikaza grešaka |
| CMR | (Certification maintenance requirement) Zahtjevi iz certifikata za održavanje |
| DMU | (Data management unit) Računalo za nadzor i kontrolu rada sustava |
| EASA | (European Union Aviation Safety Agency) Agencija Europske unije za sigurnost zračnog prometa |
| EIU | (Engine Iterface Unit) Sučelje |
| EGT | (Exhaust Gas Temperature) Temperatura ispušnih plinova |
| EPR | (Engine pressure ratio) Omjer tlakova na ulazu i izlazu motora |
| ECU | (Engine control unit) Kontrolne jedinice motora |
| EEC | (Electronic engine controller) Elektronički upravljač rada motora |
| FADEC | (Full Authority Digital Engine Control) Sustav za kontrolu rada motora |
| FMS | (Flight Management System) Sustav upravljanja letom |
| FRV | (Fuel Return Valve) Upravljanje povratnim ventilom goriva |
| GPS | (Global Positioning Sytem) Sustav za određivanje položaja |
| HMU | (Hidromechanical Unit) Hidro-mehanička jedinica |
| HPTCC | (High pressure turbine clearance control) Upravljanje zazorom lopatica visokotlačne turbine između kućišta i vrhova lopatice turbine |
| ICAO | (International Civil Aviation Organization) Međunarodna organizacija za civilno zrakoplovstvo |
| ISC | (Industry Steering Committee) Upravljački odbor za industriju |
| ITT | (Interstage Turbine Temperature) Temperatura međustupanjnske turbine |
| JAA | (Joint Aviation Authorities) Zajedničko zrakoplovno tijelo |
| LPTCC | (Low Pressure Turbine Active Clearance Control) Upravljanje zazorom lopatica niskotlačne turbine |
| LRU | (Line Replaceable Unit) Linijski zamjenjiva jedinica |
| MPD | (Maintenance Planning Document) Dokument za planiranje održavanja |
| MCDU | (Multipurpose Control Display Unit) Višenamjenski upravljački zaslon |
| MRBR | (Maintenance Review Board Report) Odbor za ocjenjivanje održavanja |
| MSG | (Maintenance Sterring Group) |

| | |
|------|---|
| MWG | (Maintenance Working Groups) Grupa stručnjaka za održavanje |
| MEL | (Minimum equipment list) Zahtjev minimalne ispravnosti opreme |
| NVM | (Non Volatile Memory) Trajna memorija |
| OAT | (Outside Air Temperature) Vanjska temperatura zraka |
| OAMP | (Operator's Approved Maintenance Program) Odobreni program održavanja zrakoplovnog prijevoznika |
| PACS | (Pressurisation and Air Conditioning System) Sustav za hlađenje i klimatizaciju |
| TBV | (Transient Bleed Valve) Upravljanje ventilima za odzračivanje |
| TAT | (Total Air Temperature) ukupna temperatura zraka |
| TC | (Type Certificate) certifikat tipa zrakoplova |
| TIT | (Turbine Inlet Temperature) Ulazna temperatura trubine |
| VBV | (Variable bleed valves) Protupumpažni ventili s promjenjivim ispuštanjem zraka iz kompresora |
| VSV | (Variable stator vanes) Upravljanje promjenjivim nagibom statorskih lopatica |

Popis slika

| | |
|---|----|
| Slika 1. Podjela održavanja prema normi EN 13306:2010 [1]..... | 7 |
| Slika 2. Primjer mlaznog turboventilatorskog motora [14]..... | 13 |
| Slika 3. Položaj ventilatora, kompresora, komore izgaranja i turbina na CFM56 motoru [18] | 17 |
| Slika 4. On Board Maintenance sustav [25] | 21 |
| Slika 5. MCDU Menu [25]..... | 22 |
| Slika 6. Komponente FADEC sustava [16]..... | 24 |
| Slika 7. Prikaz parametara primarnih vrijednosti na zaslonu u kokpitu [18] | 25 |
| Slika 8. Prikaz parametara sekundarnih vrijednosti na zaslonu u kokpitu [18]..... | 26 |
| Slika 9. FADEC mreža [18] | 30 |
| Slika 10. Pregled procesa praćenja trenda motora [37] | 32 |
| Slika 11. Grafički prikaz <i>delta</i> vrijednosti na primjeru odstupanja od EGT | 34 |
| Slika 12. EGT margina [40] | 36 |
| Slika 13. Opadanje EGTM tijekom vremena [40] | 36 |
| Slika 14. Smanjenje EGT margine s radnim ciklusima motora [40] | 37 |
| Slika 15. Primjer istrošenih lopatica turbine i kompresora [39]..... | 37 |
| Slika 16. Uzroci pogoršanja EGT margine [40] | 38 |
| Slika 17. Promjena EGT margine dvaju motora [37] | 38 |
| Slika 18. Promjena EGT margine dvaju motora [37] | 39 |
| Slika 19. Potrošnja/protok goriva dvaju motora [37] | 39 |
| Slika 20. Uljni sistem CFM motora [39] | 40 |
| Slika 21. Tlak ulja za dva motora [37] | 41 |
| Slika 22. Greška očitavanja senzora tlaka ulja [37]..... | 41 |
| Slika 23. Odnosi EGT i brzine vrtnje N1 u odnosu na vanjsku temperaturu [37] | 42 |
| Slika 24. Prikaz brzine vrtnje dva motora [37] | 42 |
| Slika 25. Položaj vibracijskih senzora za različite motore [37] | 43 |
| Slika 26. ZVB1F-trend pri polijetanju [37]..... | 44 |
| Slika 27. Vibracije motora u različitim fazama leta u periodu od 6 mjeseci [37] | 45 |
| Slika 28. Usporedna analiza više parametara [43]..... | 45 |
| Slika 29. Stepenasto povećanje vrijednosti parametara [43] | 46 |
| Slika 30. Odnos troškova servisa LLP dugolinijskih i kratkolinijskih letova [11] | 47 |
| Slika 31. Utjecaj neotkrivenog iznenadnog kvara [46]..... | 49 |

Popis tablica

Tablica 1. Konstrukcijsko - eksploatacijske karakteristike CFM56-5B motora [19] 18

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI


Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je _____ **diplomski rad**
(vrsta rada)

isključivo rezultat mojega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom UTVRĐIVANJE TEHNIČKOG STANJA MLAZNOG MOTORA PRAĆENJEM RADNIH PARAMETARA, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 30.08.2022.

MATEJ PRLENDA 
(ime i prezime, potpis)