Utjecaj održavanja na performanse zrakoplovnog mlaznog motora

Jurjević, Iva

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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:119:120677

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Iva Jurjević

UTJECAJ ODRŽAVANJA NA PERFORMANSE ZRAKOPLOVNOG MLAZNOG MOTORA

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKI ISPIT

Zagreb, 26. ožujka 2018.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Održavanje zrakoplova**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 4599

Pristupnik: **Iva Jurjević (0135229030)**
Studij: **Aeronautika**

Zadatak: **Utjecaj održavanja na performanse zrakoplovnog mlaznog motora**

Opis zadatka:

Opisati princip rada i performanse zrakoplovnog mlaznog motora. Objasniti degradaciju performansi mlaznog motora prilikom eksploatacije zrakoplova. Analizirati načine praćenja stanja i performansi u eksploataciji i održavanju zrakoplova. Odrediti utjecaj održavanje mlaznog motora na poboljšanje performansi prema primjerima iz literature i prakse.

Mentor:



doc. dr. sc. Anita Domitrović

Predsjednik povjerenstva za diplomski ispit:

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

UTJECAJ ODRŽAVANJA NA PERFORMANSE ZRAKOPLOVNOG MLAZNOG MOTORA

IMPACT OF MAINTENANCE ON AIRCRAFT JET ENGINE PERFORMANCE

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Anita Domitrović
Student: Iva Jurjević, 0135229030

Rujan, 2018.

Ovaj diplomski rad izrađen je pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Anite Domitrović. Ovim putem željela bih se zahvaliti svojoj mentorici na strpljenju, potpori, mišljenjima i savjetima koji su oblikovali ovaj diplomski rad.

UTJECAJ ODRŽAVANJA NA PERFORMANSE ZRAKOPLOVNOG MLAZNOG MOTORA

SAŽETAK

Performanse zrakoplovnog mlaznog motora imaju veliki utjecaj na sigurnost, operativne troškove i efikasnost djelovanja zračnih prijevoznika. Iz tog razloga, iznimno je bitno redovito praćenje parametara koji ocjenjuju performanse motora. Redovita praćenja su propisana od proizvođača motora i zrakoplovnih vlasti. Napredna tehnologija omogućuje predviđanje kvarova i preventivno djelovanje. Postoje parametri koji najavljuju kvar na motoru te ukoliko dođe do promjene njihovih standardnih vrijednosti potrebne su aktivnosti održavanja kako bi se stanje određenog elementa motora vratilo u početno stanje. Jedan od bitnijih parametara smatra se temperatura produkata izgaranja na ulazu u turbinu (engl. *Exhaust Gas Temperature* – EGT). EGT je indikacija kako efikasno motor proizvodi potisak te na taj način direktno utječe na potrošnju goriva. Degradacija performansi motora dovodi do toga da motor koristi više goriva za ostvarivanje jednakog potiska. To se događa zbog toga što nakon određenog broja ciklusa motora EGT raste. EGT smije rasti do određene maksimalne dopuštene vrijednosti nakon koje može doći do oštećenja motora. Održavanje motora ima funkciju vraćanja EGT-a na početnu vrijednost pri kojoj motor ima optimalne performanse.

KLJUČNE RIJEČI: mlazni motor; degradacija performansi; EGT; održavanje zrakoplova

SUMMARY

Aircraft jet engine performance has a great impact on safety, operating costs and airline operator’s efficiency. In relation to this, it is necessary to continuously monitor engine performance parameters. Monitoring programs are developed by engine manufacturers and aviation authorities. Due to development of advanced technologies, it is now possible to predict failures and perform preventive activities. Certain engine parameters might be an early indication of a failure, and any deviation from standard values requires maintenance action to return it to the initial state. One of the most important engine parameters is an Exhaust Gas Temperature (EGT). The EGT is an indication of how efficient a jet engine is in terms of thrust production. Therefore, it is directly linked to fuel consumption. Engine performance degradation can lead to increased fuel consumption for the same amount of thrust compared to the engine without such degradation. This is directly connected to an increased EGT value that

occurs after certain engine life cycles. The EGT can rise to its maximum value, beyond which there is a strong possibility of an engine damage. Engine maintenance has the function of restoring EGT to the initial value, at which the engine has optimal performance.

KEYWORDS: jet engine; performance deterioration; EGT; aircraft maintenance

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. PRINCIP RADA I PERFORMANSE ZRAKOPLOVNOG MLAZNOG MOTORA 3
2.1. Princip rada i konstrukcija mlaznih motora 3
2.2. Performanse mlaznih motora 5
2.2.1. Potisak mlaznog motora 5
2.2.2. Stupanj iskoristivosti i snaga propulzije 6
2.2.3. Pokazatelji performansi mlaznog motora 7
3. NAČINI PRAĆENJA I ANALIZA STANJA MLAZNOG MOTORA I PERFORMANSI 10
3.1. Načini praćenje stanja motora 10
3.2. Praćenje stanja parametara motora 11
3.3. Praćenje potrošnje goriva 14
3.4. Analiza ulja za podmazivanje i potrošnje ulja 15
3.5. Vibracijska analize 17
3.6. Vizualni pregledi 18
4. DEGRADACIJA PERFORMANSI MLAZNOG MOTORA 19
4.1. Uzroci degradacije performansi 19
4.2. Dugoročna i kratkoročna degradacija performansi 23
4.3. Utjecaj EGT margine na degradaciju performansi 24
5. ODRŽAVANJE MLAZNOG MOTORA I UTJECAJ NA OBNAVLJANJE PERFORMANSI 29
5.1. Načini i svrha održavanja zrakoplovnog mlaznog motora 29
5.2. Standardne mjere održavanja prema rezultatima praćenja stanja motora 32
5.3. Utjecaj održavanja na performanse motora 33
5.3.1. Utjecaj pranja motora na performanse 34
5.3.2. Utjecaj zamjene komponenti motora na performanse 36

5.3.3. Utjecaj zamjene dijelova sustava za indikaciju performansi motora 38
6. ZAKLJUČAK 42
LITERATURA 44
POPIS KRATICA 46
POPIS SLIKA 47
POPIS TABLICA 49

1. UVOD

Performanse zrakoplovnog mlaznog motora imaju veliki utjecaj na sigurnost, operativne troškove, kvalitetu usluge i efikasnost djelovanja zračnih prijevoznika. Degradacija performansi motora usko je povezana sa stanjem, kvarom ili otkazom motora te može dovesti do narušavanja sigurnosti putnika, posade i svih ostalih sudionika u zračnom prijevozu. Kako bi se to spriječilo, bitno je pravovremeno djelovanje kroz postupke prilikom eksploatacije i održavanja zrakoplova.

Zahvaljujući naprednoj tehnologiji, omogućeno je praćenje svih parametara i performansi mlaznog motora. Praćenjem performansi motora na vrijeme se mogu uočiti odstupanja i pravilnim održavanjem ukloniti kvar, spriječiti ga i produžiti radni vijek motora. Na taj način se također utječe i na troškove eksplotacije i održavanja motora, a također i zrakoplova.

Cilj ovog diplomskog rada je predstaviti, analizirati i odrediti učinak održavanja na performanse zrakoplovnog mlaznog motora.

Rad je podijeljen u šest cjelina:

1. Uvod
2. Princip rada i performanse zrakoplovnog mlaznog motora
3. Načini praćenja i analiza stanja mlaznog motora i performansi
4. Degradacija performansi mlaznog motora
5. Održavanje mlaznog motora i utjecaj na obnavljanje performansi
6. Zaključak

Nakon uvoda, u drugom poglavlju prikazan je princip rada i konstrukcija te osnovne performanse zrakoplovnog mlaznog motora. Objašnjeni su svi pokazatelji performansi zrakoplovnog mlaznog motora.

U trećem poglavlju prikazani su načini praćenja i analiza stanja mlaznog motora i performansi. Objašnjeno je na koji način letačko i tehničko osoblje prati stanje motora, potrošnju goriva, stanje ulja, razinu vibracija i slično. Također je objašnjen značaj redovitog praćenja stanja motora. Praćenje EGT-a smatra se iznimno bitnim korakom u praćenju

parametara motora jer utječe na potrošnju goriva i time omogućuje značajne uštede zračnim prijevoznicima.

U četvrtom poglavlju prikazano je na koji način može doći do degradacije performansi zrakoplovnog mlaznog motora te koje su posljedice degradacije. Objašnjena je razlika između kratkoročne i dugoročne degradacije. Analizirana je povezanost degradacije performansi i EGT margine te je objašnjeno kako promjena EGT margine utječe na povećanu potrošnju goriva. Prikazan je utjecaj okoline na degradaciju performansi te promjena stope degradacije s obzirom na broj ciklusa motora. Pri objašnjavanju utjecaja degradacije na EGT korišten je primjer degradacije visokotlačne turbine.

Peto poglavlje prikazuje na koji način održavanje mlaznog motora utječe na obnavljanje performansi zrakoplovnog mlaznog motora. Objašnjene su vrste održavanja zrakoplovnog mlaznog motora te njihov utjecaj na poboljšanje performansi motora. Prikazane su razlike u vrijednostima određenih parametara prije i nakon održavanja. Korišteni su primjeri na motoru CFM56 preuzeti od zračnih prijevoznika.

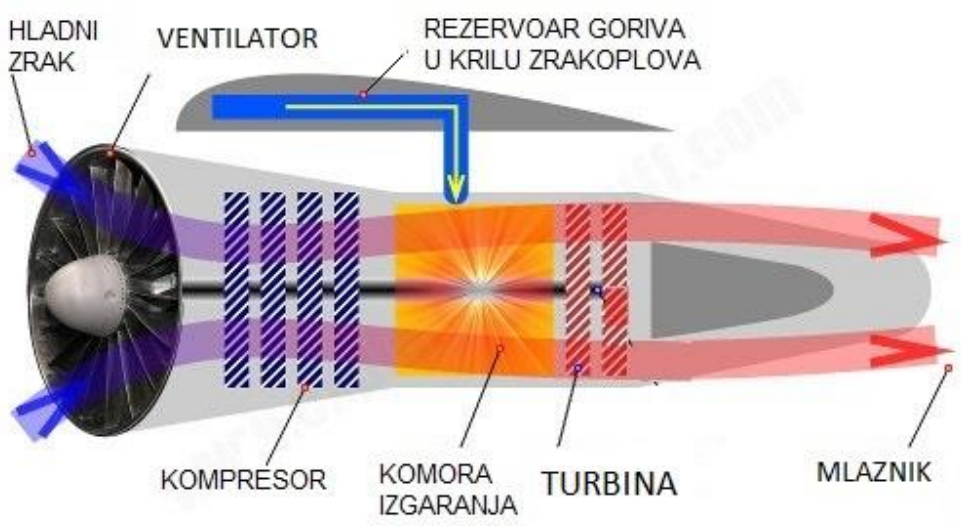
U šestom, zaključnom poglavlju, predstavljeni su zaključci analiza provedenih u radu.

2. PRINCIP RADA I PERFORMANSE ZRAKOPLOVNOG MLAZNOG MOTORA

Većina modernih zrakoplova pogonjeni su mlaznim motorima. Mlazni motor na principu 3. Newtonovog zakona stvara potisnu silu koja mogućuje zrakoplovu kretanje kroz zrak. U ovom dijelu rada objašnjeno je na koji način mlazni motor radi i koje su definirane performanse motora čije praćenje omogućuje pravilno planiranje aktivnosti održavanja motora.

2.1. Princip rada i konstrukcija mlaznih motora

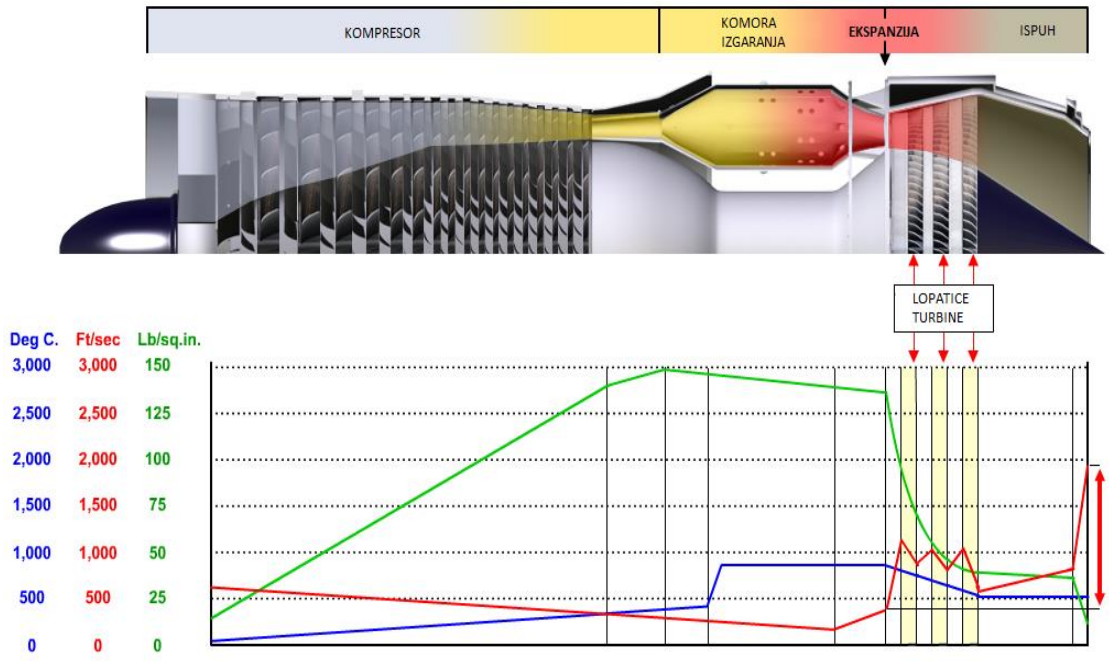
Zrakoplovni mlazni motor sastoji se od 5 glavnih dijelova: uvodnik, kompresor, komora izgaranja, turbina i mlaznik. Slika 1. prikazuje glavne dijelove mlaznog motora. [1]



Slika 1. - Dijelovi mlaznog motora [1]

Na ulazu u motor hladni zrak prolazi kroz lopatice ventilatora koje su najčešće napravljene od titana. Kompresor se sastoji od lopatica i pričvršćeno je za vratilo. Nakon kompresora koji stlačuje zrak, takav stlačeni zrak se u komori za izgaranje miješa s gorivom te gorivo izgara. Unutrašnjost komore izgaranja je izrađena od keramičkih materijala koji je tako čine otpornom na visoke temperature. Kao produkt izgaranja nastaju ispušni plinovi koji pokreću lopatice turbine. S obzirom da su turbina, kompresor i ventilator uvodnika povezani istom osi (vratilom), pokretanjem turbine, također se pokreću kompresor i ventilator. Mlaznik je posljednja

komponenta mlaznog motora. Potisna sila nastaje kao reakcija na mlaz ispušnih plinova u mlazniku. [2]

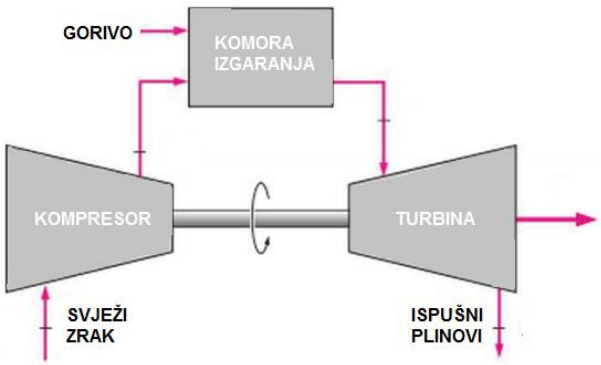


Slika 2. - Promjena parametara radne tvari u mlaznom motoru [3]

Slika 2. prikazuje promjenu parametara radne tvari kroz motor. [3] Ispod grafičkog prikaza konstrukcije motora prikazan je graf iz kojeg se može očitati promjena temperature, brzine i statičkog tlaka u motoru. Plavom linijom na grafu prikazana je promjena temperature iskazana u stupnjevima Celzijusa. Crvenom linijom prikazana je promjena brzine iskazana u stopama u sekundi (engl. *feet per second* - ft/sec). Zelenom linijom prikazana je promjena statičkog tlaka u motoru u PSI.

Zrak ulazi u uvodnik. Uvodnik je u obliku difuzora što uzrokuje smanjenje brzine za otprilike 60% i povećanje statičkog tlaka. Nakon uvodnika, u kompresoru se zrak komprimira. Kompresija dovodi do povećanja tlaka, što uzrokuje povećanje temperature. U komoru izgaranja ubrizgava se gorivo koje se raspršuje i izgara. Gorivo se ubrizgava iz spremnika za gorivo koji se nalaze u krilima i/ili u trupu zrakoplova. U komori za izgaranje gorivo se miješa sa stlačenim zrakom i izgara, stvarajući vruće ispušne plinove. Taj proces uzrokuje povećanje temperature. Smjesa koja izgara nekada može dosegnuti temperaturu i od 900°C. U komori izgaranja, suprotno temperaturi, tlak neznatno pada zbog otpora strujanja. Dio oslobođene toplinske energije se koristi na lopaticama turbine gdje dolazi do pretvaranja u mehanički rad

koji se koristi za pokretanje kompresora. Prolaskom kroz turbinu dolazi do smanjenja temperature i tlaka. Okretanjem turbine, okreće se i kompresor i ventilator. To se događa jer su povezani istim vratilom koje uzrokuje da se okretanjem jedne komponente, okreću i ostale u nizu što prikazuje slika 3. Produkti izgaranja poslije turbine prolaze kroz mlaznik u kojem dolazi do povećanja brzine, a produkti izgaranja ekspandiraju do približno vrijednosti tlaka okoline. Ostatak potencijalne energije se u ovom dijelu pretvara u kinetičku energiju. Brzina vrućeg zraka na izlazu iz mlaznika je veća od brzine hladnog zraka koji ulazi u uvodnik i to zapravo stvara potisnu silu (potisak) koja pokreće zrakoplov. [1]



Slika 3. - Shematski prikaz vratila koje povezuje kompresor i turbinu

2.2. Performanse mlaznih motora

Postoji nekoliko glavnih pokazatelja performansi zrakoplovnog mlaznog motora. Svi pokazatelji imaju isti zadatak, a to je da prikažu učinkovitost i efikasnost rada motora pri određenim uvjetima. Za zračne prijevoznike je iznimno bitno pratiti pokazatelje performansi motora iz sljedećih razloga: zadovoljavanja sigurnosnih kriterija, ekonomske isplativosti (smanjivanja operativnih troškova), smanjenje utjecaja na okoliš te smanjenje emisija.

2.2.1. Potisak mlaznog motora

Glavni pokazatelj performansi zrakoplovnog mlaznog motora je potisna sila (potisak). To je sila koja nastaje kao posljedica promjene količine gibanja hladnijeg zraka koji ulazi u uvodnik manjom brzinom i vrućih ispušnih plinova koji izlaze iz mlaznika većom brzinom. Prema tome, pojednostavljeni izraz za potisak je:

$$F_T = \dot{m}_a\, v_5 - \dot{m}_a\, v_0$$

gdje je:

F_T - sila potiska [N]

v_5 – brzina ispušnih plinova [m/s]

v_0 – brzina zraka na ulazu u motor [m/s]

$\dot{m}_a$ – maseni protok zraka [kg/s]

Iz tog slijedi da je rezultanti potisak zapravo razlika između maksimalnog ili statičkog potiska i dinamičkog otpora. Temperatura i tlak okolnog zraka imaju veliki utjecaj na potisnu silu. Povećanjem temperature dolazi do pada potisne sile što stvara problem u režimima polijetanja ili prekinutog slijetanja jer u tim režimima je potrebna maksimalna potisna sila. [2]

Za kretanje zrakoplova motor koristi princip 3. Newtonovog zakona. U motor se usisava velika količina zraka koji se zagrijava, stlačuje i usporava. Nakon toga se zrak usmjerava kroz lopatice koje se okreću određenom brzinom. Kako se zrak i gorivo miješaju, temperatura goriva raste. Vrući ispušni plinovi izlaze iz motora u suprotnom smjeru od smjera gibanja zrakoplova. [2].

Brzina vrtnje niskotlačnog vratila (engl. *N1 speed*) najčešće se koristi kao indikacija potiska. Izražava se u postotcima okretaja u minuti (engl. *revolutions per minute* – RPM). Uz brzinu vrtnje, za neke modele motora dodatno se može koristiti omjer ukupnih tlakova (engl. *Engine Pressure Ratio* - EPR) i brzina vrtnje N2 odnosno N3, ovisno o vrsti motora. EPR se definira kao omjer ukupnih tlakova. To je zapravo omjer ukupnog tlaka na izlazu iz motora i ukupnog tlaka na ulazu u motor. N2 odnosno N3 brzina je brzina vrtnje visokotlačnog kompresora i izražava se u RPM-u. Izrazito povećana brzina vrtnje N1, N2 (ili N3) ili EPR je znak sloma sile uzgona na lopaticama kompresora (engl. *engine stall*). Suprotno tome, niska brzina vrtnje N1, N2 (ili N3) ili EPR može biti indikacija nedostatka/gubitka plamena u komori izgaranja (engl. *engine flameout*). [4]

2.2.2. Stupanj iskoristivosti i snaga propulzije

Stupanj iskoristivosti propulzije (engl. *Propulsion efficency*) pokazuje kako se efikasno uložena snaga mlaznog motora koristi za pogon zrakoplova. Stupanj iskoristivosti propulzije definira se kao:

$$\eta_p = \frac{korisna\ snaga\ za\ pokretanje\ zrakoplova}{uložena\ snaga} \text{ [2]}$$

2.2.3. Pokazatelji performansi mlaznog motora

Glavni pokazatelji performansi mlaznog motora su: ukupan stupanj korisnosti, specifična potrošnja goriva, specifični potisak i specifična težina. To su zapravo pokazatelji koji omogućuju odrediti ekonomičnost i efektivnost rada motora. [2]

Ukupni stupanj iskoristivosti (engl. *Overall efficiency*) zapravo prikazuje koliko se razvijene snage izgaranjem goriva pretvara u korisnu snagu (snagu propulzije). Za praktične proračune se za ocjenjivanje i određivanje ekonomičnosti rada motora umjesto stupnja iskoristivosti radije koriste parametri koji opisuju potrošnju goriva. Specifična potrošnja goriva - TSFC (engl. *Thrust specific fuel consumption)* definirana je kao odnos masenog protoka goriva i sile potiska. Prema tome, TSFC definira se kao:

$$TSFC = \frac{\dot{m}_f}{F_T} \text{ [2]}$$

Specifični potisak f_T definira se kao odnos potiska mlaznog motora F_T i protoka odnosno potrošnje zraka motora $\dot{m}_a$. Prema spomenutoj definiciji vrijedi:

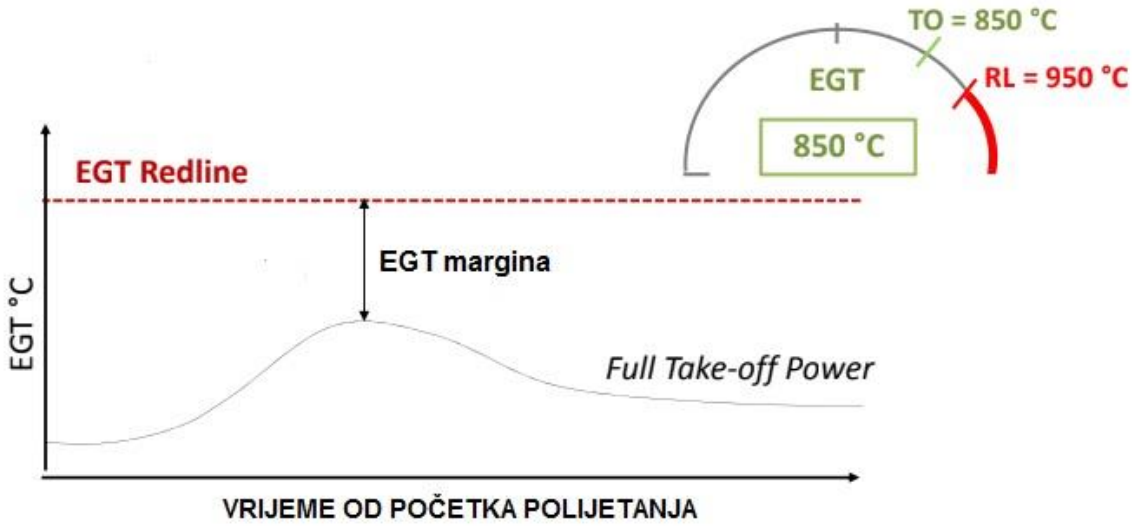
$$f_T = \frac{F_T}{\dot{m}_a} \text{ [2]}$$

Također vrlo bitan pokazatelj je i specifična težina koja se definira kao odnos potiska i težine ili mase motora, poznatije kao *F/W ratio*. Današnji zrakoplovi imaju motore koji imaju veći F/W i cilj je daljnjim razvojem povećati taj omjer. To se postiže korištenjem novih materijala i poboljšanjem stupnjeva korisnosti. Također pri razvoju zrakoplova cilj je postići motor sa što manjom specifičnom potrošnjom goriva koja će omogućiti veći dolet i povećanje plaćenog teret. Suprotno tome, poželjno je postići što veći specifični potisak kako bi se smanjila težina motora i smanjili instalacijski otpori zbog manjeg poprečnog presjeka motora. [2]

Od svih nabrojenih pokazatelja, potrošnja goriva smatra se najbitnijim pokazateljem performansi motora. S obzirom da najveći postotak troškova zračnih prijevoznika odlazi na gorivo, bilo je potrebno uvesti velika tehnička i operativna unaprijeđena kako bi se došlo do što veće učinkovitosti u potrošnji goriva. Istraživanjima je došlo do zaključka da se kod zračnih prijevoznika koji raspolažu sa većim brojem različitih tipova zrakoplova, dodjeljuju zrakoplovi

određenim rutama prema potrošnji goriva i financijskoj isplativosti. Također, s vremenom se dizajn samog motora prilagodio boljoj potrošnji goriva. Počele su se koristit lake metalne legure za izradu elemenata motora, uveo se aerodinamičniji oblik motora i ventilatora, povećala se temperatura na ulazu u motor i slično. Osim toga smanjenje buke i emisija su također dovele do značajnih promjena u performansama mlaznih motora. Prema tome, noviji motori pružaju veću učinkovitost u potrošnji goriva i manje emisije. [12] [13] [15] Parametar koji se koristi za praćenje stanja motora je EGT (engl. *Exhaust Gas Temperature*). To je temperatura produkata izgaranja na ulazu u turbinu. Smatra se indikacijom kako efikasno motor proizvodi potisak. Iznimno je bitan parametar jer svojom promjenom uvelike utječe na potrošnju goriva. Izražava se u stupnjevima Celzijusa. Svaki motor ima propisanu, odnosno maksimalnu dopuštenu temperaturu koja se ne smije prekoračiti (engl. *EGT Redline*). Također, u literaturi se koristi i pojam „metalurška granica“ [2]. U slučaju prekoračenja te temperature, može doći do oštećenja motora.

Povećanje EGT-a je indikacija degradacije performansi motora i može uzrokovati oštećenja dijelova motora i iz tog razloga je potrebno vrijednost EGT-a održavati pri dopuštenim vrijednostima. EGT margina (engl. *EGT margine* – EGTM) je razlika između *EGT redline* i aktualne temperature koju motor ima tijekom eksploatacije, kako je prikazano slikom 4. [4].



Slika 4. - Primjer EGT margine [4]

S obzirom da tijekom polijetanja EGT doseže najveće vrijednosti, EGTM je razlika između *EGT redline* i vrijednosti EGT-a za vrijeme polijetanja. Motor ima bolje performanse uz veću EGT marginu. Prema primjeru na slici 4., maksimalna dopuštena temperatura koja se ne smije prekoračiti iznosi 950 °C, a temperatura pri maksimalnom potisku pri polijetanju (engl. *Full Take-off Power*) iznosi 850 °C. Iz toga se zaključuje da EGT margina iznosi 100 °C.

3. NAČINI PRAĆENJA I ANALIZA STANJA MLAZNOG MOTORA I PERFORMANSI

Zahvaljujući naprednoj tehnologiji, omogućeno je praćenje svih parametara i performansi mlaznog motora. Praćenjem performansi motora na vrijeme se mogu uočiti odstupanja i pravilnim održavanjem ukloniti kvar, spriječiti ga i produžiti radni vijek motora. Analiza stanja motora i performansi omogućuje značajno smanjenje troškova po satu leta. Osim utjecaja na troškove bitan je i utjecaj na sigurnost. Redovnim praćenjem stanja i performansi mlaznog motora omogućeno je pravovremeno otkrivanje i uklanjanje kvarova.

3.1. Načini praćenje stanja motora

Svaki motor pokazuje učinke istrošenosti tijekom vremena. Postoji nekoliko uzroka u radu motora koji mogu uzrokovati degradaciju performansi i potencijalne kvarove turbine. Neki od uzroka su: skupljanje prljavštine na uvodniku te lopaticama kompresora i turbine, erozija dijelova motora, korozija dijelova motora, oštećenje stranim objektom, istrošenost ležajeva, istrošenost brtvi, pretjerana izduženja vrhova lopatica, napuknuti disk ili lopatica i slično. [5] Praćenje stanja motora razvijeno je s ciljem pravovremenog upozoravanja o kvaru. Točnim predviđanjem omogućuje se promjena ili popravak kritičnog elementa. To se postiže tako da se prate odstupanja u parametrima motora koje se pojavljuju nakon određenog broja sati leta ili nakon određenog broja ciklusa. Cilj je utvrditi stanje bez rastavljanja motora. To se može postići korištenjem sofisticiranih tehnologija i ugradnjom senzora na motoru.

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 se od ostalih navedenih razlikuju po tome što se jedine mogu obavljati za vrijeme rada motora tokom leta. Ostale metode podrazumijevaju praćenje parametara dok motor ne radi. Redovito praćenje stanja motora

omogućilo je operaterima da model održavanja prema "ograničenom radnom vijeku" (engl. *hard time*) zamjene održavanjem prema trenutnom stanju motora (eng. *On Condition*), odnosno da stalnim praćenjem stanja (engl. *Condition Monitoring*) u svakom trenutku imaju uvid u stanje motora. To je ujedno omogućilo i smanjenje troškova te povećanje razine sigurnosti. [6]

3.2. Praćenje stanja parametara motora

Praćenje stanja parametara motora (engl. *Engine Condition Trend Monitoring* – ECTM) se koristi operativne podatake iz rada motora za pronalaženje simptoma oštećenja, kvarova ili pretjerane istrošenosti elemenata motora. To je tehnika s kojom se redovito prati "zdravlje" motora. Pomoću praćenja poznatih parametara kao što su vanjska temperatura zraka (engl. *Outside Air Temperature* – OAT), brzina zrakoplova, temperatura između visokotlačne turbine i niskotlačne turbine (engl. *Interstage Turbine Temperature* – ITT), brzina vrtnje kompresora i turbine, protok goriva i vibracije, operatori lakše mogu predvidjeti potrebne aktivnosti održavanja prije nego nastane kvar.

ECTM sustav sastoji se od četiri elementa:

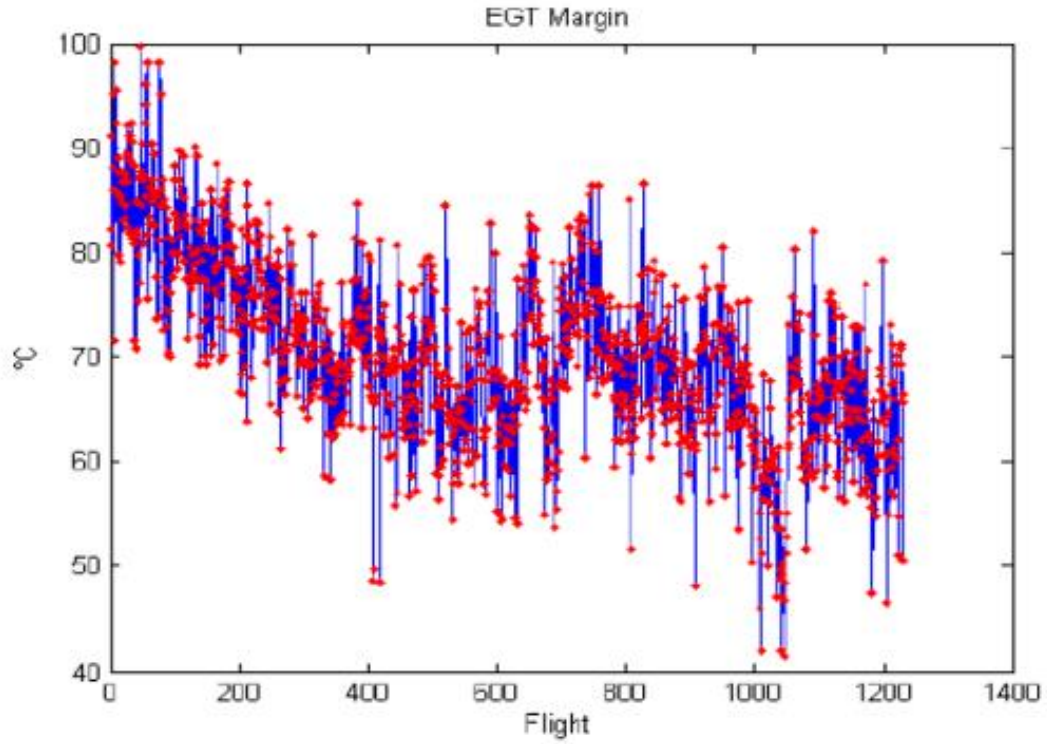
- dobivanje podataka u letu,
- pretvaranje i uspoređivanje podataka s matematičkim modelima,
- otkrivanje anomalija iz analize trendova,
- slanje obavijesti o postojanju anomalija.

Postoje tri osnovna parametra čije promjene prati ECTM:

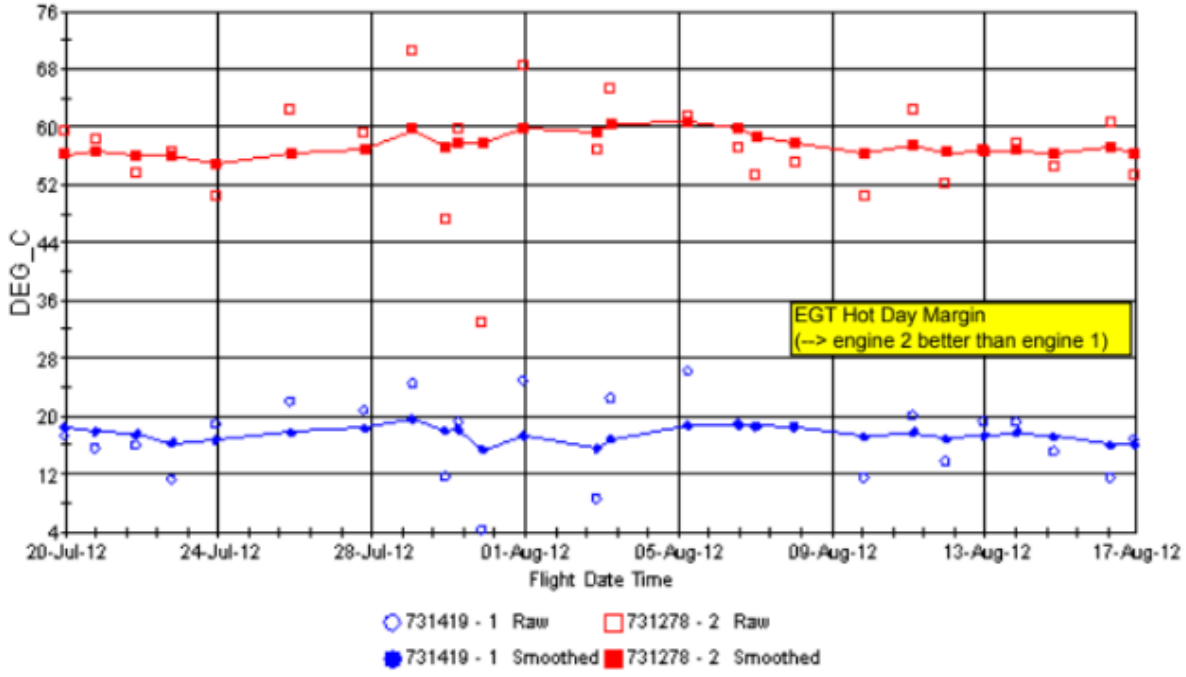
- promjena EGT margine,
- potrošnja goriva,
- brzina vrtnje niskotlačnog vratila.

Promjena EGT margine bitni je pokazatelj moguće degradacije performansi. Promjenu EGT margine prati promjena potrošnje goriva. Porastom potrošnje goriva raste brzina vrtnje visokotlačne turbine i visokotlačnog kompresora. Ukoliko se to ne događa, došlo je do kvara ili pogreške u senzorima. Podaci o navedenim parametrima dobivaju se putem mjernih sondi koje se nalaze na motoru. S obzirom da vrijednost EGT margine ima veliki utjecaj na performanse motora, bitno je otkriti načine na koje se prati promjena EGT margine.

Slika 5. prikazuje graf koji služi za praćenje vrijednosti EGT margine povećanjem broja ciklusa motora. [4] Iz slike 5. može se zaključiti da vrijednosti EGT margine pada s povećanjem broja ciklusa. Ovakvi grafovi pomažu u boljem razumijevanju trenda trošenja motora.



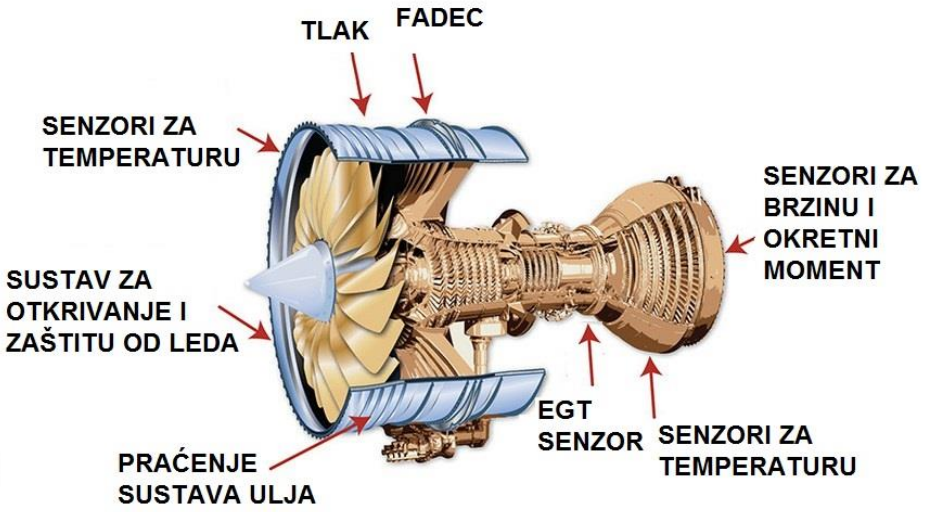
Slika 5. - Praćenje promjene EGT margine povećanjem broja ciklusa [4]



Slika 6. - Praćenje EGTM za oba motora A320 [17]

Napredna tehnologija je omogućila precizno praćenje i analizu svih parametara stanja motora. Slika 6. prikazuje graf u kojem se može pratiti vrijednost EGTM kroz 30 dana za oba motora zrakoplova Airbus A320. Podaci su iz 2012. godine i preuzeti su od zračnog prijevoznika [17]. Plava boja predstavlja vrijednost za motor broj 1, a crvena za motor broj 2. Bitno je napomenuti da podaci ne moraju biti jednaki za oba motora, obzirom da motori ne moraju imati isti broj ciklusa. U ovom slučaju motor broj 1 ima lošiju EGTM. Razlog tomu je veća istrošenost motora broj 1 usljed eksplotacije.

Slika 7. prikazuje senzore u zrakoplovnom mlaznom motoru. [7] Prikazani su senzori za temperaturu, tlak, brzinu, okretni moment, sustav za otkrivanje i zaštitu od leda, EGT senzor i senzori za praćenje sustava ulja. Signali očitani senzorima pretvaraju se u električne signale i šalju do sustava motorskih računala (engl. *Full Authority Digital Engine Control* – FADEC).



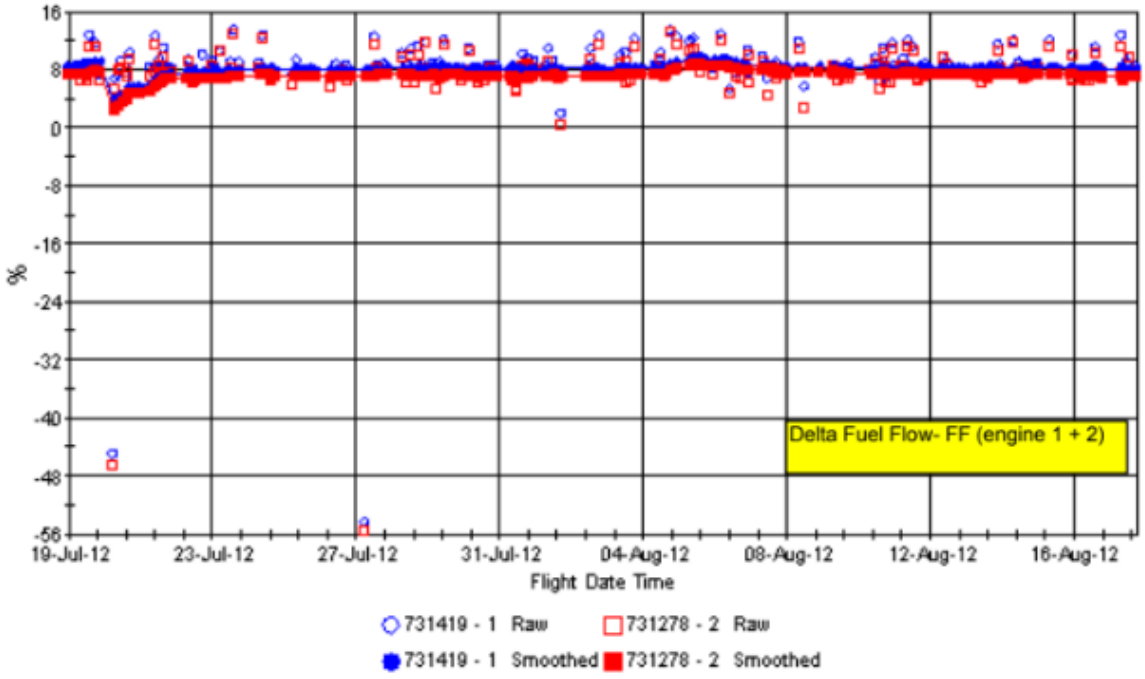
Slika 7. - Prikaz senzora u zrakoplovnom mlaznom motoru [7]

FADEC je sustav koji kontrolira sve aspekte performansi zrakoplovnog motora. Svrha ovog sustava je da pruži učinkovitiji rad motora i omogućuje proizvođaču određivanje maksimalnih vrijednosti iznad kojih motor ne može normalno funkcionirati. Također pruža lakše praćenje stanja motora. Uvođenjem FADEC-a, omogućilo se automatsko upravljanje motorima.

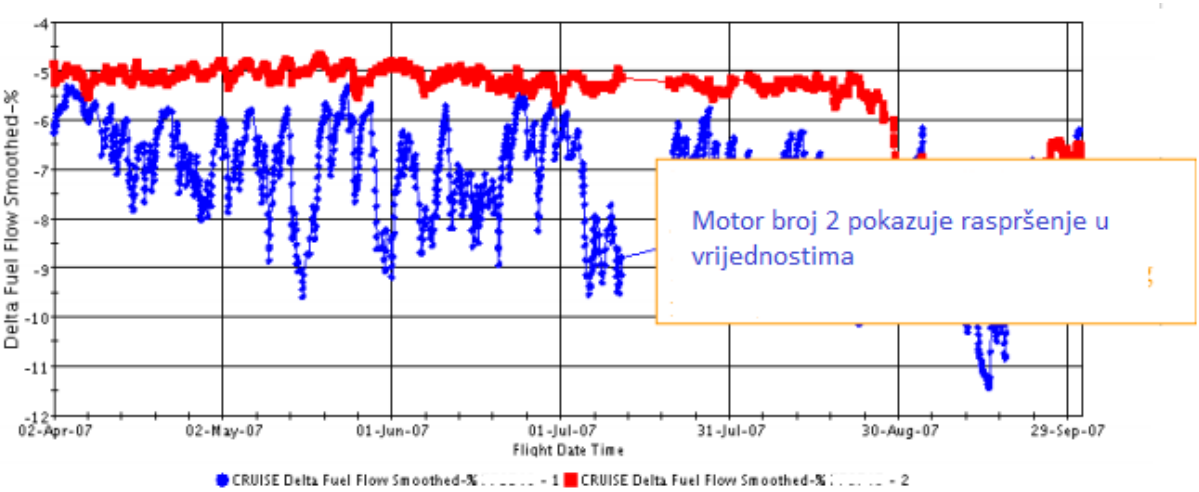
3.3. Praćenje potrošnje goriva

Potrošnja goriva je jedan od iznimno korisnih performansi zrakoplovnog mlaznog motora, direktno je povezana sa vrijednosti EGT margine. Smanjenje EGT margine je jedan od glavnih pokazatelja degradacije performansi motora. U prijašnjim poglavljima je prikazano da se EGT margina smanjuje sa starošću motora. Gubljenjem učinkovitosti motora, dolazi do povećanja EGT i sukladno tome smanjenja EGT margine što ima za posljedicu veću potrošnju goriva. Potrošnja goriva se smatra značajnim parametrom za operatere, jer povećava troškove. TSFC i efikasnost motora su u obrnuto proporcionalnom odnosu. Povećanjem TSFC, dolazi do smanjenja efikasnosti motora. Suprotno tomu, smanjenje TSFC-a dovodi do povećanja efikasnosti motora.

Potrošnja goriva se prati pomoću grafova koji su prikazani na slici 8. Podaci su iz 2012. godine i preuzeti su od zračnog prijevoznika. [17] Plava boja prikazuje potrošnju goriva motora broj 1, a crvena potrošnju za motor 2. Slika 8. prikazuje podatke za motore A320 u periodu od 30 dana. Potrošnja goriva je približno jednaka za oba motora. Također može se primjetiti da nema većih oscilacija u potrošnji. Potrošnja goriva također ovisi i o temperaturi zraka. Ukoliko nema pretjeranih promjena u temperaturi, potrošnja će biti približno jednaka kroz cijeli period. U prikazanim podacima vremenski uvjeti su bili približno jednaki kroz cijeli period.



Slika 8. - Potrošnja goriva u periodu od 30 dana motora A320 [17]



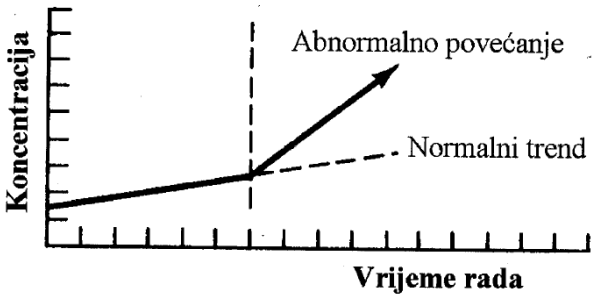
Slika 9. - Primjer prikaza greške u protoku goriva na primjeru motora zrakoplova A320 [17]

Često se može dogoditi da grafovi za praćenje vrijednosti potrošnje goriva prikazuju veliku razinu raspršenja vrijednosti kao na slici 9. Podaci su preuzeti od zračnih prijevoznika. [17]

Na primjeru motora broj 1 teško je uočiti kolika je prosječna potrošnja goriva zbog raspršenih vrijednosti. Vrijednosti se u prekratkom vremenskom razdoblju razlikuju za +/- 5%. U ovakvom slučaju treba uzeti u obzir potencijalnu grešku sustava za indikaciju protoka goriva. Greška sustava za indikaciju se može uočiti tako da se usporede svi motori na zrakoplovu i primjeti da svi imaju približno jednake rezultate. Također, greška sustava za indikaciju može se prepoznati ukoliko se na grafu primjeti da u kratkom vremenskom periodu postoje velike razine raspršenja te nakon toga dolazi do približno konstatnih vrijednosti.

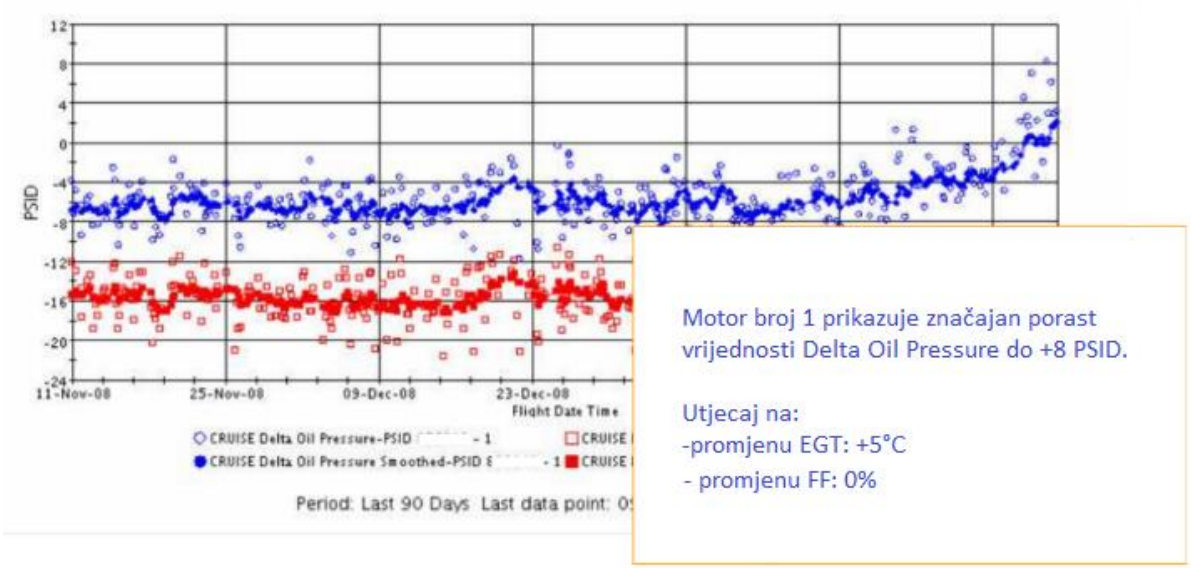
3.4. Analiza ulja za podmazivanje i potrošnje ulja

Sustav podmazivanja osigurava trajnost motora. Ono smanjuje trenje između elemenata motora i služi za hlađenje. Bitno je pratiti potrošnju ulja jer pretjerana potrošnja ukazuje na kvar motora. Ulje za podmazivanje direktno je povezano s produktima trošenja. S vremenom dolazi do trošenja dijelova motora i određena je dozvoljena koncentracija metalnih čestica u ulju za podmazivanje. Ukoliko dođe do uočavanja povećane koncentracije metalnih čestica u ulju, to ukazuje na pretjerano trošenje određenog dijela motora. Slika 10. prikazuje promjenu količine metalnih čestica u ulju kroz vrijeme. [6] Normalni trend prikazuje prihvatljivo povećanje količine kroz vrijeme. Prekoračenjem te granice dolazi do neprihvatljivog povećanja količine metalnih čestica u ulju što ukazuje na neispravnost određenog elementa motora. Ulje ima ključnu ulogu u radu motoru.



Slika 10. - Promjena količine metalnih čestica u ulju kroz vrijeme [6]

Tlak ulja je jedan od iznimno korisnih parametara koji se redovito mora pratiti. Značajnije promjene vrijednosti ukazuju na kvar u sustavu ulja. Na slici 11. je prikazan graf pomoću kojeg tehničko osoblje prati promjenu tlaka ulja (engl. *Cruise Delta Oil Pressure* - DOP*).* Podaci su preuzeti od proizvođača motora. Podaci su preuzeti od zračnog prijevoznika. [17]

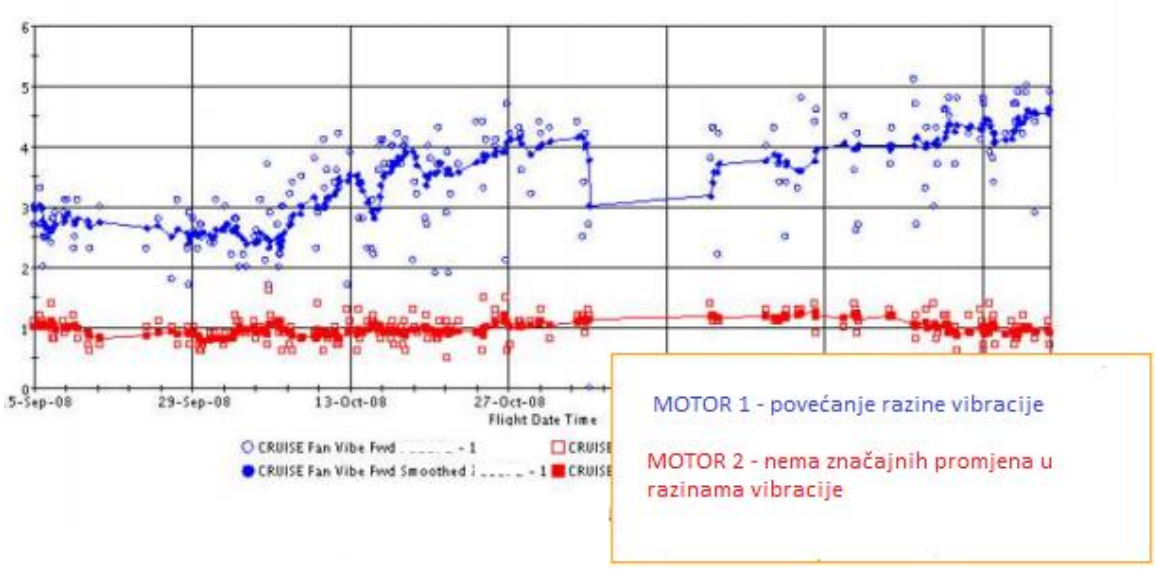


Slika 11. - Praćenje promjene tlaka ulja na motoru zrakoplova tipa A320 [17]

Plava boja predstavlja vrijednosti za motor broj 1, a crvena za motor broj 2. Kod motora broja 1 primjećuje se značajni porast tlaka do vrijednosti od +8 PSI. U ovom slučaju je daljnjim analizama parametara utvrđeno da je porast DOP utjecao na ΔEGT. Utjecaj na ΔEGT iznosio je +5 °C, dok utjecaja na potrošnju goriva i promjenu brzine vrtnje N2 nije bilo. Do porasta tlaka ulja je došlo zbog začepljenosti sustava za dovod ulja (engl. *oil supply line*).

3.5. Vibracijska analize

Podaci o vibracijama često se smatraju indikacijama naglih promjena stanja motora ili dijelova motora za razliku od temperatura i tlaka koji služe se praćenje nekih sporijih promjena koje su već uzrokovale neki kvar. Senzori za praćenje vibracija postavljaju se na nosaču motora i na osjetljivijim dijelovima koji su izloženi jakim vibracijama i naprezanjima, kao npr. kućište ventilatora, kompresor i najzagrijaniji dijelovi komore za izgaranje. Iako su vibracije normalna pojava kod motora jer se motor sastoji od više dijelova koji neprestano rade velikim brzinama vrtnje, postoje granične vrijednosti koje se nikako ne smiju prekoračiti. Senzori prate razinu vibracija kroz vrijeme te na taj način omogućuju predviđanje neispravnosti. [6]



Slika 12. - Praćenje razine vibracija na motoru zrakoplova tipa A320 [17]

Slika 12. prikazuje graf na kojem tehničko osoblje prati razinu vibracija na motoru zrakoplova tipa Airbus A320. Podaci su preuzeti od zračnog prijevoznika. [17] Plava boja predstavlja vrijednosti razine vibracija za motor broj 1, a crvena za motor broj 2. Kod motora broj 1 dolazi do pojave povećanja razine vibracija, dok kod motora broj 2 nema značajnih promjena. U ovom slučaju problem je riješen balansiranjem (engl. *fan trim balance*) i podmazivanjem ventilatora (engl. *relubrification*).

3.6. Vizualni pregledi

Vizualni pregledi koriste se kao najstarija metoda pregleda stanja motora. Pouzdanost ove metode ovisi o sposobnosti i iskustvu tehničkog osoblja koje obavlja preglede. Pregledi se vrše endoskopima. To su optički uređaji s kojima se može prodrijeti kroz male otvore gdje optička sonda doseže do područja koje se ispituje. Uređaji imaju mogućnost osvjetljavanja unutrašnjosti, snimanja, fotografiranja i iznimno su korisni kod pregleda tamnih područja. Nedostatak ove metode je što se može koristit samo za otkrivanje većih grešaka, a ne i manjih. Prednost je što se motor ne treba skidati za vrijeme pregleda. Koristi se za pregled komore izgaranja, turbina i kompresora. [6]

4. DEGRADACIJA PERFORMANSI MLAZNOG MOTORA

Mjere za smanjenje potrošnje goriva i emisija dijele se na: proučavanje degradacije performansi, aktivnosti održavanja motora i praćenje trenda promjene potrošnje goriva. S obzirom da performanse zrakoplovnih mlaznih motora imaju veliki utjecaj na operativne troškove i učinkovitost, iznimno je bitno obratiti pozornost na degradaciju performansi i kontinuirano pratiti stanje motora i njegovih performansi. Poznate su dvije vrste degradacija: kratkoročna i dugoročna. Kratkoročna degradacija performansi se pojavljuje u prvih stotinu letova nakon prvog korištenja motora. Dugoročna degradacija performansi se događa akumuliranjem broja radnih sati zrakoplovnog mlaznog motora. [8]

4.1. Uzroci degradacije performansi

Dugogodišnjim istraživanjima i analizama otkriveno je što najčešće utječe na degradaciju performansi. Veliki utjecaj imaju [10]:

- broj ciklusa i *flight leg*,
- vremenski uvjeti,
- *derate*,
- kvaliteta materijala,
- *on-wing* održavanja.

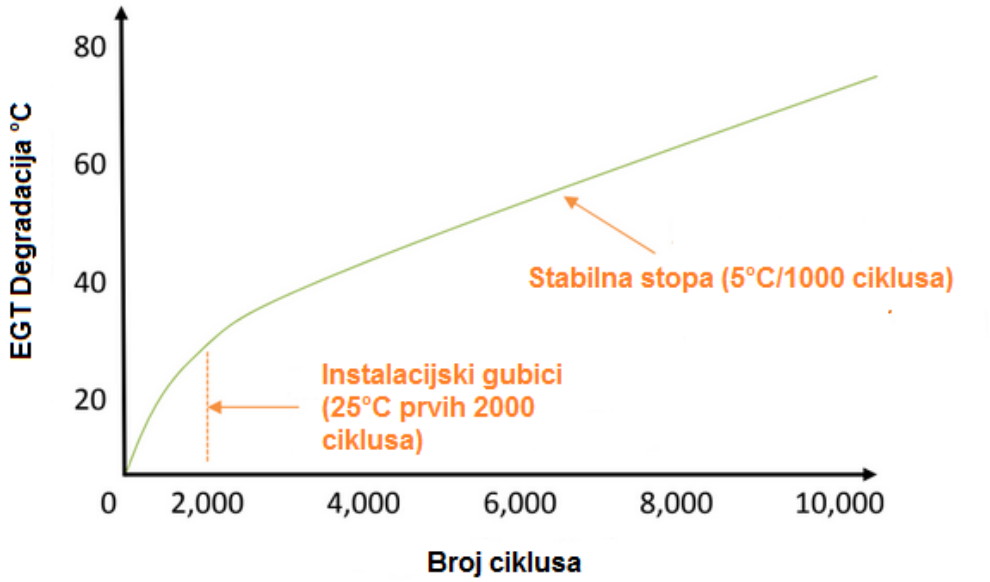
Pogoršanje performansi zrakoplovnog mlaznog motora uzrokovano je degradacijom mehaničkog stanja pojedinih dijelova motora. Značajan učinak imaju letna opterećenja (engl. *flight loads*) koja iskrivljuju oblik kućišta motora, proizvode trenje i povećavaju zračnost između pojedinih dijelova motora. Također, bitno je napomenuti da degradacija mehaničkog stanja dijelova motora ovisi o upotrebi pojedinog elementa. Ne rade svi dijelovi motora u jednakim uvjetima i pod jednakim opterećenjima. Prema tome, ne mogu imati iste dijagnoze pogoršanja performansi. Za primjer se može uzeti kompresor i turbina. Kod kompresora dolazi do smanjenja kapaciteta i učinkovitosti. Kod turbina također dolazi do smanjenja učinkovitosti i do promjene mogućeg protoka. To dovodi do zaključka da nemaju svi elementi isti radni vijek. Dozvoljeni radni vijek se razlikuje za sve elemente motora prema težini radnih uvjeta. [8] Radni vijek dijelova motora se iskazuje u ciklusima. Jedan ciklus predstavlja period neprekidnog rada

zrakoplovnog motora od pokretanja do gašenja. Pojedini elementi radni vijek mogu imati iskazan u satima leta.



Slika 13. - Prikaz uzroka povećanje potrošnje goriva

Smanjenje EGT margine velikim dijelom uzrokovano je povećanjem zračnosti između rotorske lopatice i kućišta motora. Povećana zračnost dovodi do smanjenja EGTM. Takav problem dovodi do povećane potrošnje goriva što uvelike smanjuje učinkovitost rada motora. Navedeni odnos prikazan je na slici 13. [4]



Slika 14. - Promjena EGT degradacije s povećanjem broja ciklusa [4]

Stopa smanjenja EGT margine je najveća pri inicijalnim operacijama, a kasnije, nakon uhodavanja, doseže stabilnu razinu smanjenja. Slika 14. prikazuje promjenu stope smanjenja EGT margine s povećanjem broja ciklusa. [4] Prvih 2000 ciklusa dolazi do povećane stope smanjenja EGT margine zbog gubitaka prilikom ugradnje motora (otprilike 25°C), a kasnije dolazi do stabilne stope od otprilike 5°C po 1000 ciklusa.

Stopa smanjenja EGT-a definira se kao [15]:

$$EGTDecay = \frac{\Delta EGT}{(\frac{CSI}{1000})}$$

gdje je:

EGT Decay – stopa smanjenja EGT-a

ΔEGT – promjena EGT-a s brojem ciklusa

CSI – broj ciklusa od ugradnje motora na zrakoplov.

Stopa degradacije EGT margine ovisi o letnim operacijama. Stopa degradacije se povećava:

- povećanjem potisne sile,
- smanjenjem *engine derate*,
- smanjenjem prosječnog segmenta leta (engl. *flight leg)*,
- starenjem motora (noviji motori imaju veću EGT marginu i manju stopu degradacije u odnosu na starije motore). [4]

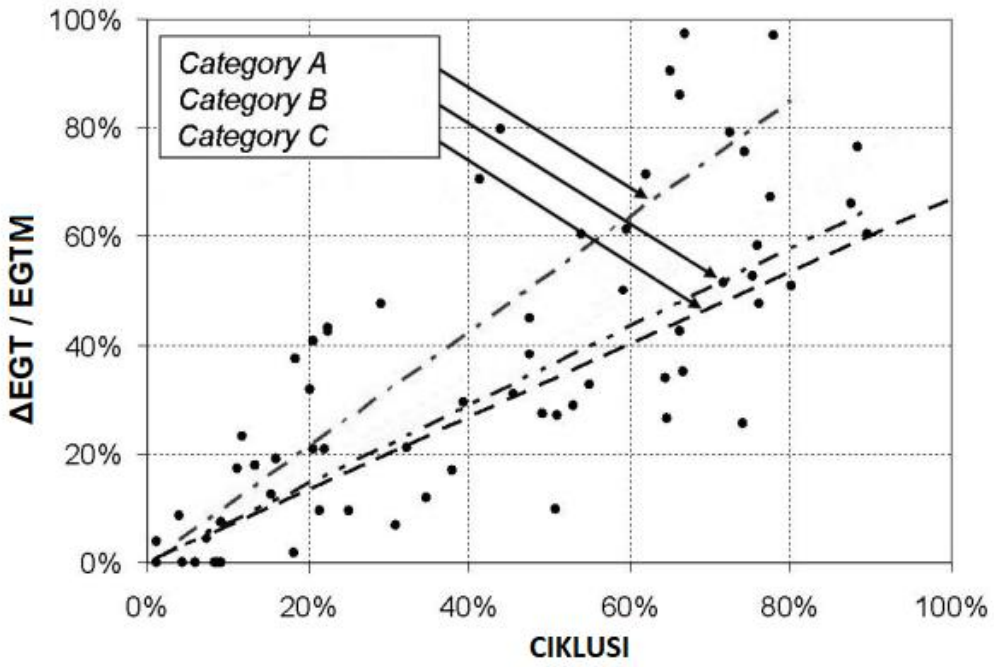
Sve komponente motora su izložene različitim mehanizmima degradacije koji uključuju:

- visoke i niske cikluse zamora materijala,
- termo-mehaničke zamore,
- eroziju / koroziju.

Ostali uzroci *off-wing* održavanja su:

- oštećenje stranim objektima (engl. *Foreign Object Damage* - FOD),
- prevelika potrošnja ulja/propuštanje ulja,
- vibracije,
- uvjeti naredbi o plovidbenosti [4]

Kako bi se još bolje objasnilo da performanse svakog motora ne degradiraju jednako, potrebno je napomenuti da okolina ima veliki utjecaj na performanse motora. Slika 15. prikazuje stopu degradacije prikazanu u porastu EGT-a za flotu od 60 zrakoplova istog tipa motora, ali u različitim okolinama. [11]



Slika 15. - Utjecaj okoline na degradaciju performansi motora [11]

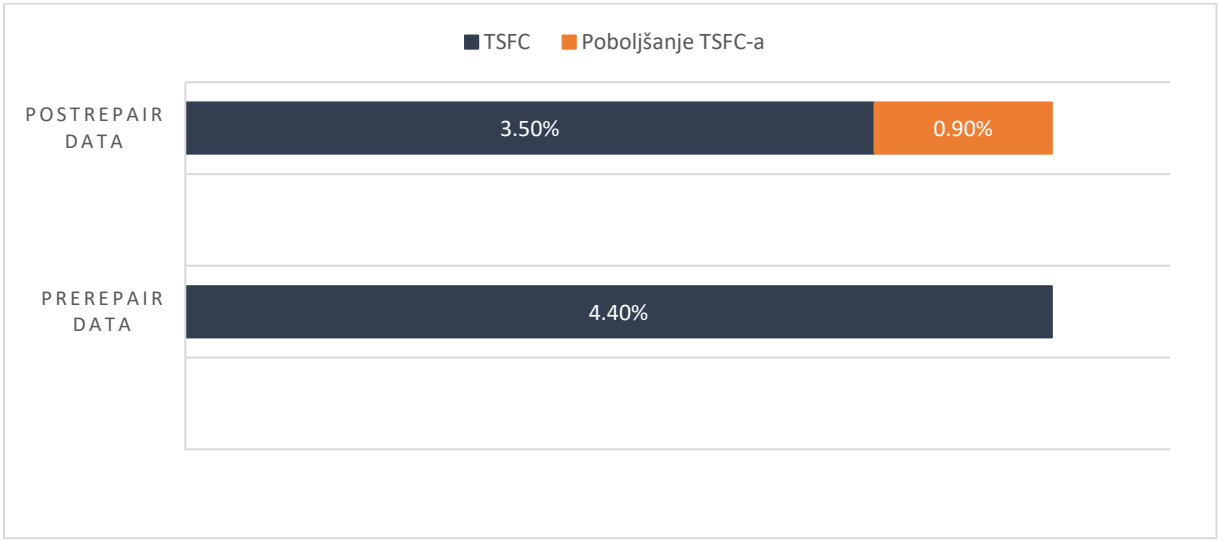
Zrakoplovi u kategoriji A su polijetali i slijetali s aerodroma u područjima u kojima prašina i pijesak imaju velike kontaminacijske i erozijske utjecaje na motor zrakoplova. U kategoriji B su testirani zrakoplovi polijetali i slijetali s aerodroma u čijoj okolini je visoka industrijska zagađenost. Kategoriju C predstavljaju zrakoplovi koji su vršili operacije na aerodromima koji se nalaze u svim ostalim okolinama koje ne spadaju u kategoriju A i B. Rezultati testiranja pokazali su da operacije koje su se vršile u kategoriji A imaju najveći porast degradacije performansi u usporedbi s ostalim okolinama.

Osim okoline, utjecaj ima i vrsta profila leta za koje je predviđen zrakoplov. Za primjer se može uzeti zračni prijevoznik A i zračni prijevoznik B. Ako se pretpostavi da zračni prijevoznik A u toku jednog dana odradi više kraćih letova, za motor zračnog prijevoznika A smatra se da ima odrađenih više letnih ciklusa nego što je to slučaj za motor zrakoplova prijevoznika B koji u danu odradi samo jedan duži let. Zračni prijevoznik A odradi jedan sat leta po ciklusu dok zračni prijevoznik B odradi tri sata leta po jednom ciklusu. Oba prijevoznika mogu imati iste flote zrakoplova, ali performanse im neće degradirati jednako. Iskustveno je dokazano prema podacima zračnog prijevoznika da se degradacija performansi drastično ne osjeti na letovima kraćim od 120 minuta. [17]

4.2. Dugoročna i kratkoročna degradacija performansi

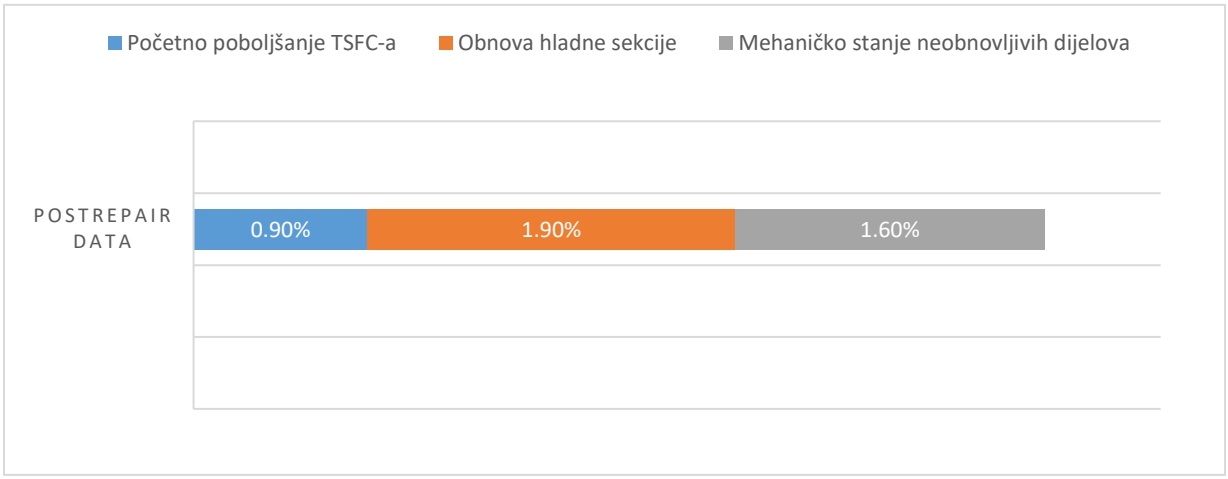
Degradacija performansi mlaznog motora podjeljenja je u dva vremenska okvira: degradacije koje se pojavljuju u prvih stotinu letova nakon ugradnje motora na zrakoplov i one koje se razvijaju nakon perioda konstantnog korištenja motora. Analizama su dobiveni rezultati koji prikazuju da mlazni motor gubi otprilike 1% u TSFC za vrijeme prvog leta u usporedbi s performansama novog motora na razini mora u statičkim uvjetima. Taj gubitak do 200tog sata raste do 1.5%. Također, dokazano je da je 55% TSFC gubitaka povezano s pogoršanjem performansi uvodnika, niskotlačnog kompresora i niskotlačne turbine, dok je 45% povezano s pogoršanjem performansi visokotlačnog kompresora i visokotlačne turbine. Kratkoročna degradacija performansi događa se kao rezultat povećanja razmaka uzrokovano trenjem između statičkih i rotirajućih dijelova. Trenje je uzrokovano izvijanjem kućišta motora i rotora koje se događa zbog velikih letnih opterećenja. Daljnjim korištenjem motora dolazi do mogućnosti većih letnih opterećenja što uzrokuje dodatna povećanja razmaka, ali sporijom stopom. [8]

Dugoročna degradacija performansi povećava se postepeno s radom motora. Analize podataka dobivenih prije popravka (engl. *prerepair data*) prikazuju da prosječni TSFC iznosi 4.4±0.5% na 3 500 letova ili na otprilike 12 000 operativnih sati u odnosu na performanse tek novog motora. Na degradaciju performansi ovog tipa utječu visokotlačna turbina i kompresor, više nego niskotlačna turbina i kompresor. [8]



Slika 16. - Iznos TSFC-a prije i poslije popravka [8]

Analiza podataka testiranja izvršenih nakon popravka motora (engl. *postrepair data*) prikazuju da degradacija TSFC iznosi 3.5±0.7% na 3500 letova, predstavljajući prosječni oporavak performansi od 0.9%, što je prikazano na slici 16.[8] Većina rezultata poboljšanja TSFC rezultat je obnove visokotlačne turbine. Analiza podataka prikazuju da dodatnih 1.9% poboljšanja u TSFC može se dogoditi obnavljanjem "hladne sekcije" (engl. *cold section*). Ostatak od 1.6% koji ostaju neobnovljeni uzrokovano je mehaničkim stanjem svih ostalih dijelova koji nisu obnavljani. Dodatna poboljšanja prikazana su na slici 17. [8] Sve vrijednosti su prikazane kao postotak u odnosu na vrijednost izmjerenu u statičkom stanju na razini mora.



Slika 17. - Utjecaj na obnavljanje TSFC-a [8]

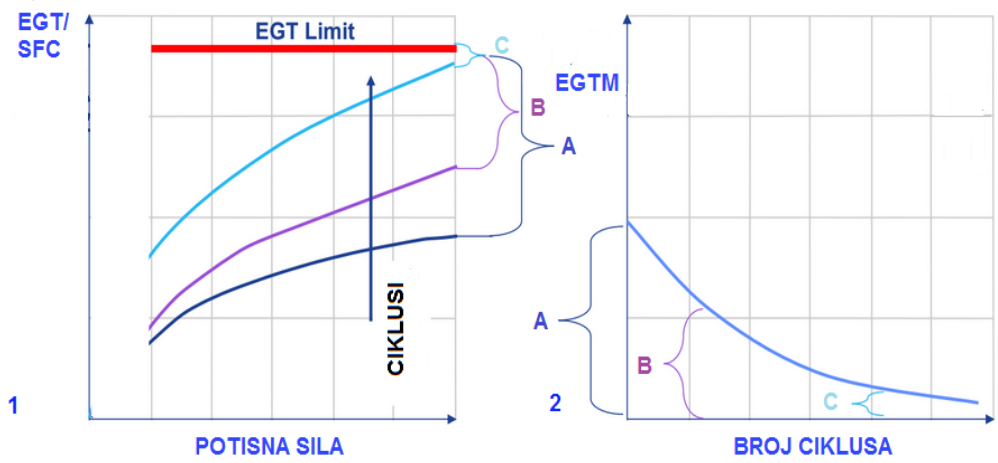
4.3. Utjecaj EGT margine na degradaciju performansi

Svako polijetanje i slijetanje te svaka minuta rada utječe na performanse motora. Zrakoplovni motor može se zamisliti kao „organizam" koji je potrebno kontrolirati jer s vremenom njegove performanse degradiraju, a dijelovi se troše i stare. Motor koji je u upotrebi preko tisuću sati i iza sebe ima isto toliko slijetanja i polijetanja, ima lopatice kompresora koje su istrošene, ležajeve koji više nisu čvrsti kao novi te dolazi do erozijskih pojava u kompresoru, komori za izgaranje te turbini. U dijelovima gdje dolazi do rada pri visokim temperaturama određeni se dijelovi nakon nekog vremena pregrijavaju i savijaju. Sve ove pojave iziskuju veću potrošnju goriva za isti EPR, koji bi novi motor postigao s manjom potrošnjom goriva. To se događa jer će sada istrošeni kompresor i turbina morati uložiti više rada kako bi se postigao isti učinak. Nastavno tome, veća količina goriva iziskuje generiranje većih temperatura u kompresoru. Iako su svi ti dijelovi izrađeni od materijala otpornih na visoke temperature, svi

imaju određenu graničnu temperaturu čije prekoračenje može našteti motoru. Najkritičniji parametar je EGT. Za primjer se može uzeti da pilot za vrijeme polijetanja pokušava postići određeni EPR, u najgorem mogućem slučaju pilot neće moći postići željeni EPR, a da ne prekorači EGT *redline*. Ukoliko dođe do takvog slučaja, postoji točno određeno vrijeme, nakon svjetlosne indikacije pilotu, u kojem motor još uvijek može normalno funkcionirati. Međutim, postoji mnogo slučajeva u kojima je došlo do otkazivanja motora nakon prekoračivanja EGT *redline* što je uzrokovalo popravke u vrijednosti od nekoliko milijuna dolara. Iako je spomenuto da je EGT najznačajniji parametar, zapravo je EGT margina osnova učinkovitosti zrakoplovnih mlaznih motora. [9]

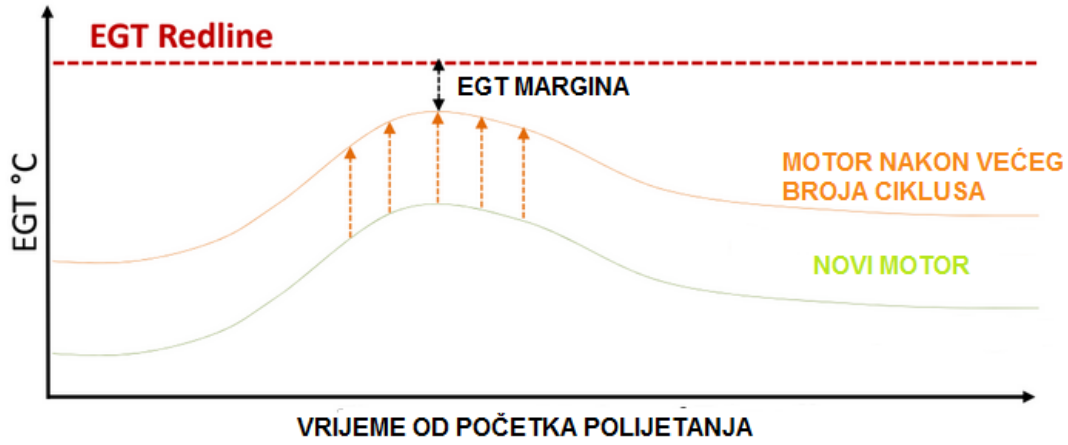
Proizvođači motora pružaju generičku stopu degradacije po 1 000 ciklusa ili 1 000 sati leta (engl. *Flight Hour*s – FH). Prema tim podacima zračni prijevoznici mogu predvidjeti svoju stopu degradacije prema svojim operacijama i načinu rada za svaki zrakoplov. Predviđeni pad pri normalnoj eksploataciji za promatrane mlazne motore zračnog prijevoznika, čiji su podaci korišteni u radu, iznosi oko 5°C na otprilike 1 000 FH. [17] Stopa degradacije različitih zračnih prijevoznika varira te za iste zrakoplove ne mora biti jednaka jer različiti operatori polijeću i slijeću na različite aerodrome, različitih duljina uzletno-sletne staze, u različitim vremenskim uvjetima. Performanse zrakoplova koji izvode operacije u toplijim predjelima s većim temperaturama degradiraju brže od zrakoplova koji većinu svojih operacija izvode u relativno mirnoj klimi u predjelima sjeverne Europe. Operatori imaju mogućnost izvoditi operacije s manjom stopom potisne sile nego što je propisano od proizvođača (engl. *derate*). U tim slučajevima pilot produžuje duljinu zatrčavanja za vrijeme polijetanja ili penje s manjom stopom penjanja. Ovo je jedan od načina kojim se smanjuje trošenje motora te se također smatra procedurom smanjenja buke iznad naseljenih područja. [9]

Slika 18. prikazuje promjenu EGT margine s brojem ciklusa. [10] Na lijevoj strani može se očitati EGT margina za tri primjera. U primjeru A je prikazana EGT margina pri najmanjem broju ciklusa. U primjeru B prikazana je EGT margina s većim brojem ciklusa od primjera A, a u primjeru C može se očitati EGT margina s najvećim brojem ciklusa. Na desnoj strani je grafički prikazan pad EGT margine s brojem ciklusa.



Slika 18. - Promjena EGT margine s brojem ciklusa [10]

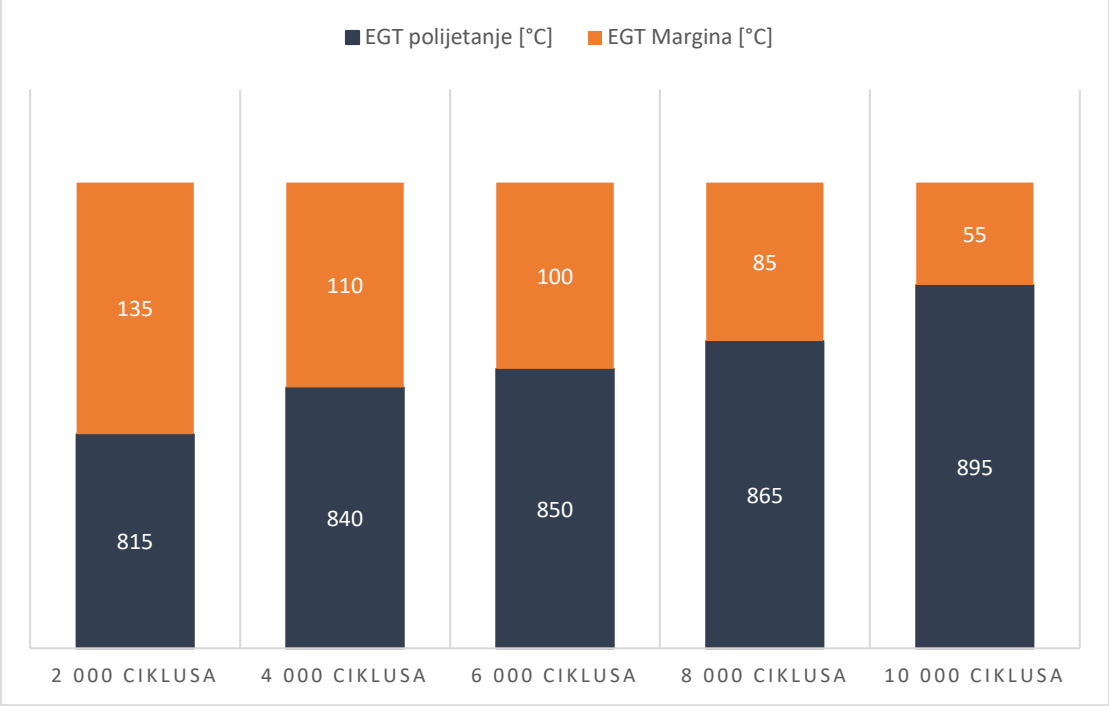
Vrijednost EGT margine je najveća kod najnovijih motora što prikazuje slika 19. Kako bi se spriječilo da vrijednost EGT ne dosegne maksimalnu dopuštenu vrijednost koja se ne smije prekoračiti, proizvođač propisuje nakon određenog broja ciklusa obavezna održavanja.



Slika 19. - Odnos EGT margine novog motora i motora nakon većeg broja ciklusa

Slika 20. prikazuje dijagram promjene EGTM s povećanjem broja ciklusa za motor tipa CFM56-7B. [4] EGT *redline* za ovaj primjer iznosi 950 °C. Plavo područje na grafovima prikazuje EGT za vrijeme polijetanja izražen u °C. Narančasto područje predstavlja EGTM također izražen u °C i predstavljenu kao razliku između EGT *redline* i EGT za vrijeme polijetanja. EGTM s povećanjem broja ciklusa opada dok EGT za vrijeme polijetanja s brojem ciklusa raste.

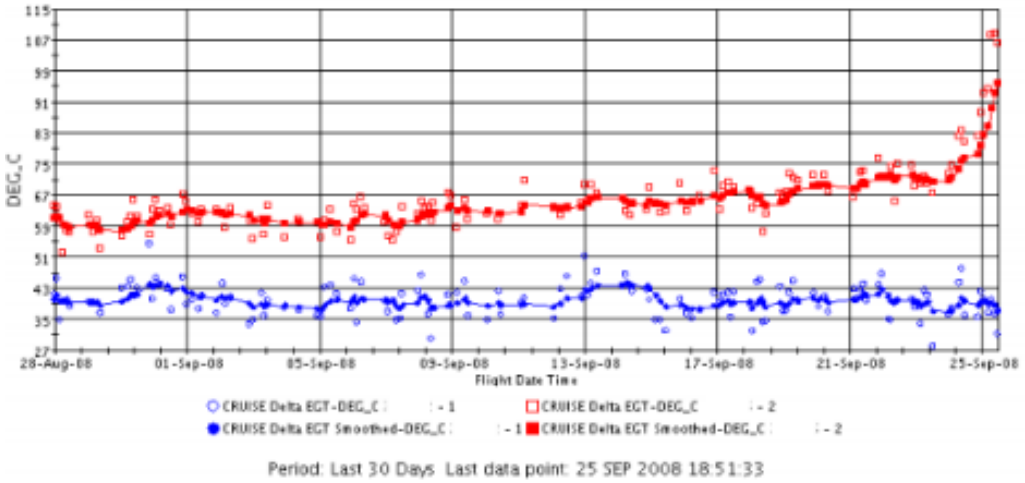
Graf na slici 20. prikazuje kako EGT u prvih 2 000 ciklusa naraste za otprilike 25°C, zatim ima približno konstatni rast od 10°C svakih 2 000 ciklusa. Prelaskom 8 000 ciklusa EGT ima drastičniji porast od 30°C.



Slika 20. - Promjena EGTM s povećanjem broja ciklusa za motor tipa CFM56-7B [4]

Kako bi se povećala EGTM potrebno je poduzeti neke od sljedećih mjera:

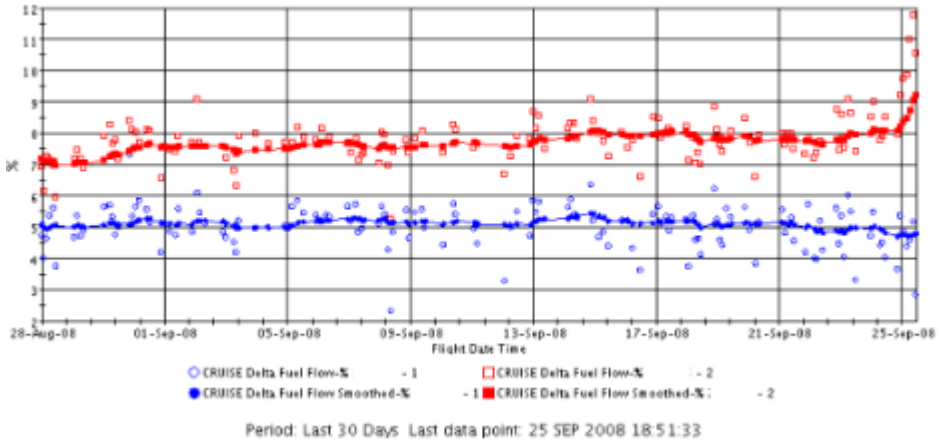
- ako je ikako moguće, smanjiti potisak pri polijetanju;
- kontrolirati masu zrakoplova, smanjiti nepotrebno gorivo i vodu te koristiti pomoćnu jedinicu za napajanje (engl. *Auxiliary Power Unit* – APU) kada je to moguće kako bi se smanjilo radno opterećenje motora;
- redovito čišćenje motora;
- planiranje ruta prema stanju motora (za motore s degradiranim performansama preporučuje se let u hladnijim područjima).



Slika 21. - Utjecaj trošenja HPT na EGT na motoru CFM56 zrakoplova tipa A320 [17]

Prema podacima preuzetim od zračnog prijevoznika, [17] na slici 21. prikazan je utjecaj trošenja visokotlačne turbine (engl. *High Pressure Turbine* – HPT) na EGT. Plava boja predstavlja motor broj 1, a crvena motor broj 2 koji je u ovom primjeru motor s degradirajućim performansama. Na grafu je prikazano kako je trošenje HPT uzrokovalo nagli porast EGT-a od 38 °C što je smanjilo EGTM za 36 °C. Sukladno tome, došlo je do povećanja protoka goriva.

Na slici 22. prikazan je utjecaj trošenja HPT na protok goriva. Protok goriva povećao se za 3.9%. [17]



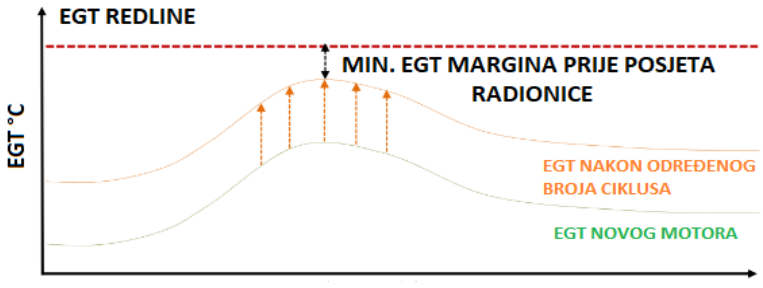
Slika 22. - Utjecaj trošenja HPT na protok goriva na motoru CFM56 zrakoplova tipa A320 [17]

5. ODRŽAVANJE MLAZNOG MOTORA I UTJECAJ NA OBNAVLJANJE PERFORMANSI

Osnovna održavanja zrakoplovnog mlaznog motora, može se reći da se događaju svaki dan prije svakog leta kada tehničko i letačko osoblje provjerava stanje motora, stanje tekućina i sve parametre koji mogu ukazati na pogrešku u radu motora. Postoje tri vrste održavanja: održavanje prema stanju, održavanje nakon isteka određenog perioda i korektivno održavanje nakon kvara ili neispravnosti određenog elementa. [6]

5.1. Načini i svrha održavanja zrakoplovnog mlaznog motora

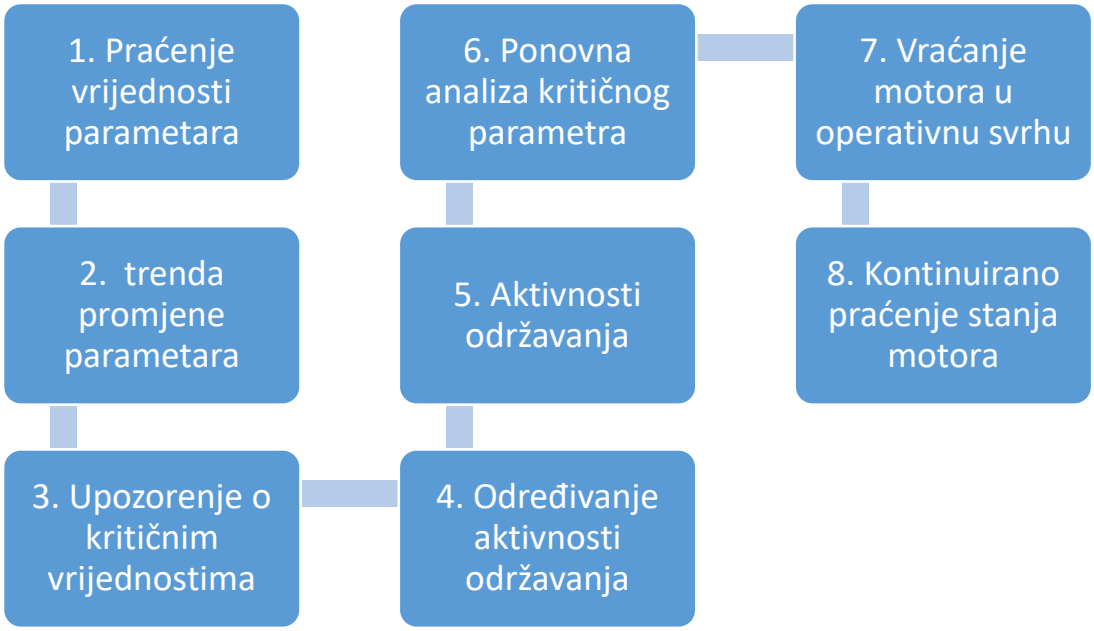
Praćenje stanja motora (engl. *Engine Condition Monitoring*) se smatra prekretnicom u održavanju zrakoplovnim mlaznim motorima jer je omogućilo kontinuirano praćenje stanja motora i određivanje potrebnih mjera održavanja te tako uvelike smanjilo troškove. Svaki dio motora je imao određeni vremenski period koji bi bio u funkciji. Nakon tog perioda se bez obzira na stanje uklanjao s zrakoplova i mijenjao. To je uzrokovalo bespotrebne troškove jer intenzitet trošenja ovisi o načinu i uvjetima ekploatacije koji su promjenjivi. Održavanje ovisno o stanju je princip održavanja kod kojeg se redovito prate svi ključni parametri i na osnovi vrijednosti parametara se zaključuje stanje samog motora te donose potrebne aktivnosti održavanja. Tehnologija modernog doba je naprijedovala do te razine da sustavi unaprijed predviđaju kvarove motora na osnovi vrijednosti parametara. Ova metoda omogućuje ekonomičnost održavanja jer se ovakvim pristupom izbjegavaju nepotrebne prijevremene zamjene komponenti. Komponente koje se održavaju na ovaj način moraju imati dijagnostičke parametre, načine njihovih ispitivanja, vrijeme između njihovih mjerenja i granične vrijednosti parametara. Za sve parametre se određuju granične vrijednosti koje element motora može dosegnuti prije posjeta radionice u svrhu održavanja. Slika 23. pobliže prikazuje smanjenje EGT margine do minimalne vrijednosti prije posjeta radionice. [12]



Slika 23. - Primjer smanjenja EGT margine do minimalne vrijednosti prije posjeta radionice [12]

Za primjer se može uzeti EGT jer se smatra bitnim parametrom performansi mlaznog motora. Rastom broja ciklusa, smanjuje se EGT margina. Vrijednost EGT margine se smije smanjivati do minimalne propisane vrijednosti nakon koje se motor mora ukloniti s zrakoplova i odvesti u radionicu na održavanje. Cilj ovog načina održavanja je da se redovitim praćenja primjete ovakve promjene i na vrijeme reagira. Nakon uočenih promjena u dijagnostičkim grafovima proučavaju se priručnici poput *Aircraft Maintenance Manual*-a i *Trouble Shooting Manual*-a. Proizvođač motora daje prikaz degradacije EGT ovisno o broju ciklusa. Prilikom praćenja svih parametara uspoređuju se stvari grafovi sa propisanima od proizvođača i na taj način utvrđuje degradira li EGT normalnim trendom.

Slika 24. prikazuje slijed praćenja stanja motora i primjenjivanja mjera održavanja. Svrha praćenja stanja motora je pratiti trend promjena vrijednosti podataka i prema trendu utvrditi koje mjere održavanja treba primjeniti.



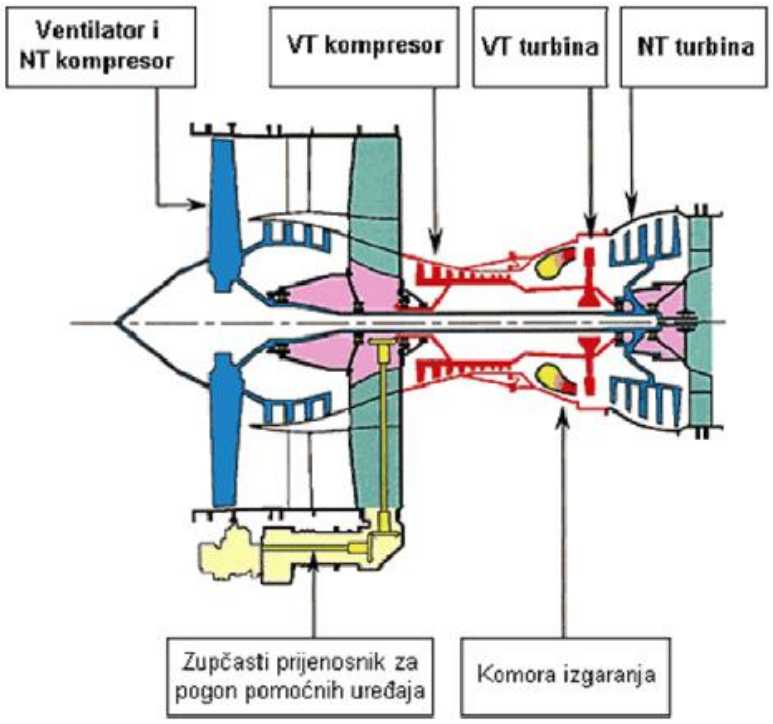
Slika 24. - Slijed praćenja stanja motora i primjenjivanja aktivnosti održavanja

Analizom podataka utvrđuju se potrebne mjere održavanja sa svrhom poboljšanja performansi. Nakon odrađenih mjera održavanja tehničko osoblje ponovno analizira vrijednosti kritičnog parametra. Nakon utvrđivanja uspješnog oporavljanja performansi motor se vraća u operativne svrhe. Stanje motora se kontinuirano prati.

Za primjer se može uzeti prepoznavanje pretjerane potrošnje goriva, gdje se analizom utvrđuje povećani EGT. Utvrđuje se razlog smanjenja EGTM i određuju mjere održavanja koje će

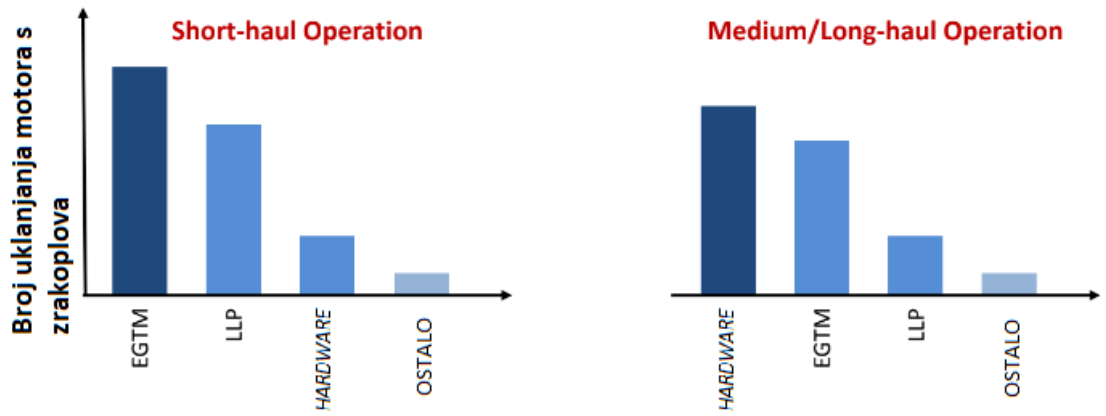
povećati EGTM. Nakon određenih mjera održavanja, ponovno se analizira EGT i motor se ponovno instalira na zrakoplov. Utvrđuje se smanjenje potrošnje goriva.

Zrakoplovni mlazni motori sadrže dijelove koji prema uvjetima određenima od proizvođača moraju biti obnovljeni nakon određenog vremena ili broja ciklusa (engl. *Life-Limited Parts* - LLP). Slika 25. prikazuje elemente s ograničenim radnim vijekom kod mlaznih motora. [6]



Slika 25. - Komponente s ograničenim radnim vijekom [6]

To su elementi motora koji rade pod najtežim uvjetima, npr. pri najvećim temperaturama i jakim centrifugalnim silama, kao što su svi elementi iza komore izgaranja, poput diskova turbine. Iako su sastavljeni od posebnih izdržljivih materijala i propisana je redovna kontrola i analiza, ovakvi dijelovi se odbacuju nakon što dosegnu krajnji rok upotrebe bez obzira na stanje u kojem se nalaze te se zamjenjuju novima. Održavanja ovih elemenata se smatra najkompleksnijim i najskupljim. Poznato je da radni vijek LLP iznosi između 15 000 i 30 000 ciklusa. Kao što prikazuje slika 25., na motoru CFM56 zrakoplova Airbus A320 četiri modula motora koji sadrže LLP-jeve imaju ograničeni radni vijek: ventilator i niskotlačni kompresor, visokotlačni kompresor, visokotlačna turbina i niskotlačna turbina.



Slika 26. - Uzroci servisiranja motora ovisno o vrsti operacija zrakoplova [4]

Postoje različiti uzroci servisiranja zrakoplovnog mlaznog motora. Uzroci se razlikuju ovisno o operacijama za koje je predviđen zrakoplov. Motori zrakoplova koji su predviđeni za kraće letove (engl. *short haul flights*) najčešće su uklanjanji i rastavljani zbog degradacije EGTM i isteka propisanog vremena korištenja komponenti s ograničenim radnim vijekom. Kod motora zrakoplova koji su predviđeni za srednje do duge letove (engl. *medium-to-long haul flights*) najčešće doživljavaju uklanjanje i rasklapanje zbog fizičke istrošenosti komponenti (engl. *hardware*) ili degradacije EGTM. Odnos uzroka uklanjanja motora s zrakoplova ovisno o vrsti operacija zrakoplova prikazan je na slici 26. [4] Općenito su najčešći uzroci: degradacija EGTM, istek LLP, istrošenost elemenata, a pod kategoriju ostalo spadaju štete uzrokovane stranim tijelom, velika potrošnja goriva i ulja, vibracije i slično.

5.2. Standardne mjere održavanja prema rezultatima praćenja stanja motora

Proizvođači zrakoplovnih motora propisuju standardne mjere i preporuke mjera održavanja prema rezultatima koji se dobiju praćenjem stanja motora. Prateći trend promjene vrijednosti EGT-a, protoka goriva i brzine vrtnje N1 i N2, tehničko osoblje može utvrditi koji element motora je uzrokovao određenu promjenu. Prateći greškolov propisan od strane proizvođača motora, tehničko osoblje može pretpostaviti uzrok i odraditi preporučene mjere održavanja. Nekoliko primjera se nalazi u tablici 1. Podaci su preuzeti od zračnog prijevoznika. [17] Primjeri se odnose na motor CFM56 i s obzirom na vrijednosti EGT-a, protoka goriva i N2 brzinu vrtnje, a sadrže pretpostavljene uzroke i preporučene mjere održavanja. Za primjer se može uzeti trošenje niskotlačnog sustava (engl. *low pressure* – LP) koja se prepoznaje porastom

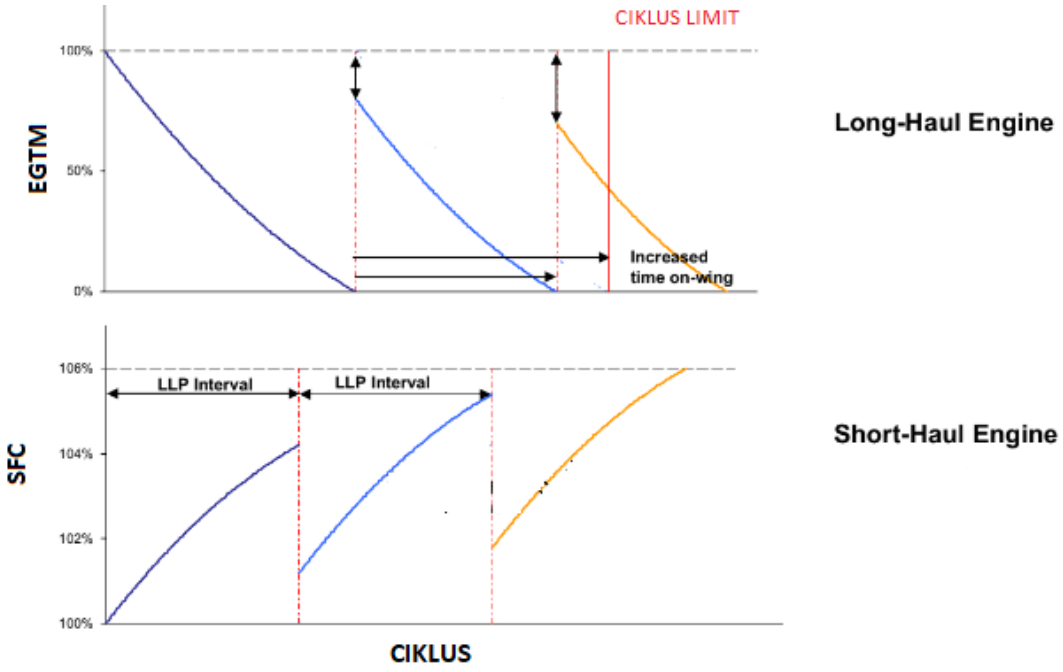
EGT-a preko 20°C, protokom goriva većim od 1.5% i vrijednost N2 brzine u rasponu između +0 i +0.5. Preporučene aktivnosti održavanja su pregled ulaznog dijela uvodnika i ispušni dio.

Tablica 1. - Primjer pretpostavljenih uzroka s obzirom na promjenu parametara za motor CFM56 [17]

EGT [°C]	FF [%]	N2 [%]	Pretpostavljeni uzrok
< +/- 10	**< +/- 1**	**< - 0,5**	VSV otvoren
< +/- 10	**< +/- 1**	**>+0,5**	VSV zatvoren
(+10,+20)	**(+1,+2)**	**(0,+0.5)**	Trošenje LP sustava
>20	**>1.5**	**(+0, +0.5)**	Trošenje LP sustava
>20	**>1.5**	**(0,-0.8)**	Trošenje HPT/HPC

5.3. Utjecaj održavanja na performanse motora

S porastom zračnog prometa, istraživali su se različiti načini zaustavljanja degradacije performansi motora. Praćenje i analiza performansi zrakoplovnog mlaznog motora omogućuje zaustavljanje pada EGTM i time sprječava preveliku potrošnju goriva. Pravovremenim otkrivanjem kvarova se smanjuju troškovi velikih održavanja i uklanjanjaju greške. Slika 27. prikazuje kako održavanje utječe na EGTM i specifičnu potrošnju goriva (engl. *Specific Fuel Consumption* – SFC). [14]



Slika 27. - Utjecaj održavanja motora na EGTM i SFC [14]

Kod motora predviđenih za duže letove (engl. *Long-Haul Engine*) ne postoji „ciklus limit“. Redovitim održavanjem, osim što dolazi do povećanja EGTM, dolazi i do povećanja vremena koje motor može provesti na zrakoplovu bez rastavljanja (engl. *Increased time on-wing*). Suprotno tomu, povećanjem broja ciklusa TSFC raste, što je uzrokovano padom EGTM. Redovitim održavanjem smanjuje se TSFC i vraća u početne vrijednosti.

Zrakoplovni mlazni motori nakon određenog broja ciklusa mogu trošiti više od 4-5% goriva nego novi ili tek servisirani motori. Ukoliko se uzme u obzir da zračni prijevoznici na gorivo potroše od otprilike 25-35% ukupnih troškova, navedeni postotak uvelike utječe na profit operatera. [12]

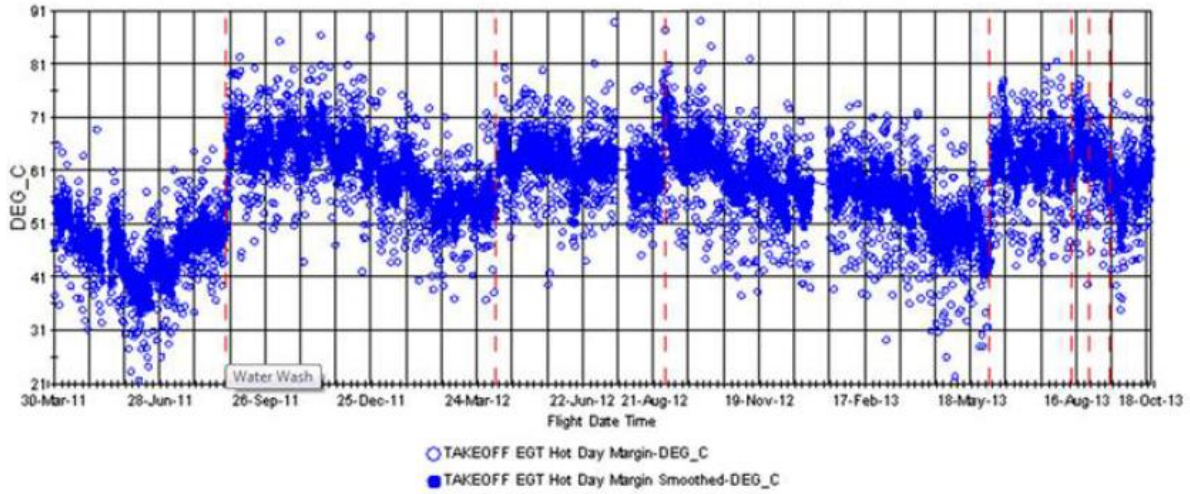
U nastavku su prikazana analize aktivnosti održavanja motora CFM 56 zrakoplova tipa Airbus A320, koje su uzrokovane pogoršanjem performasi u eksplotaciji motora. Prema podacima zračnog prijevoznika utvrđen je utjecaj pranja motora i zamjene određenih komponenti na obnavljanje performansi, odnosno „povratak“ performasi na odgovarajuće vrijednosti za rad motora. [17]

5.3.1. Utjecaj pranja motora na performanse

Pranje motora (engl. *core wash*) pokazao se kao jedan od efikasnijih načina obnavljanja performansi motora i produljivanja radnog vijeka motora. Skupljanje prljavštine na svim komponentama motora je očekivano, obzirom na uvjete u kojima motor radi. Prljavština i zagađenost nepovoljno djeluju na uvjete eksploatacije motora. Dolazi do povećanja EGT-a, što za posljedicu ima povećanu potrošnju goriva. Osim smanjenja troškova, pranje motora utječe i na smanjenje emisija dušičnih i ugljičnih oksida te omogućuje zračnim prijevoznicima rad u ekološki prihvatljivijim uvjetima.

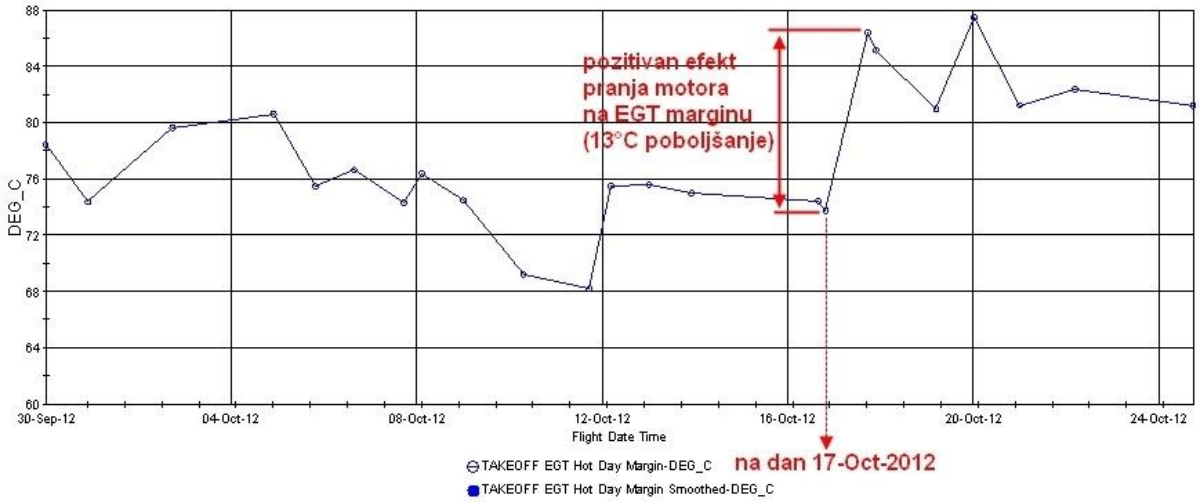
Na lopaticama kompresora nakon određenog broja ciklusa mogu se pronaći različiti ostatci organskih nečistoća i ulja. Čišćenja se obavljaju mlazovima vode te su u potpunosti ekološki prihvatljiva. Pranje motora se obavlja kada god se za tim pokaže potreba. Učestalost pranja motora ovisi o više faktora (visinama leta, vrstama operacija, okolini u kojima se izvode operacije i slično).

Slika 28. prikazuje kako pranje motora utječe na EGTM. [13] Nakon određenog broja ciklusa dolazi po smanjenja EGTM, a pranjem motora vrijednost EGTM se vraća na početne vrijednosti. Crvenim isprekidanim crtama su označeni dani kada je izvršeno pranje motora.



Slika 28. - Prikaz utjecaj pranja motora na EGTM na motoru CFM56 zrakoplova tipa A320 [13]

Prema podacima zračnog prijevoznika maksimalno poboljšanje EGTM koje je može postići pranjem motora iznosi 10-13°C. [17] Takav primjer poboljšanja EGTM prikazan je na slici 29. Graf prikazuje vrijednost EGTM na motoru CFM 56 na zrakoplovu tipa A320 u periodu od 25 dana. Podaci su iz 2012. godine i preuzeti su od zračnog prijevoznika. [17]



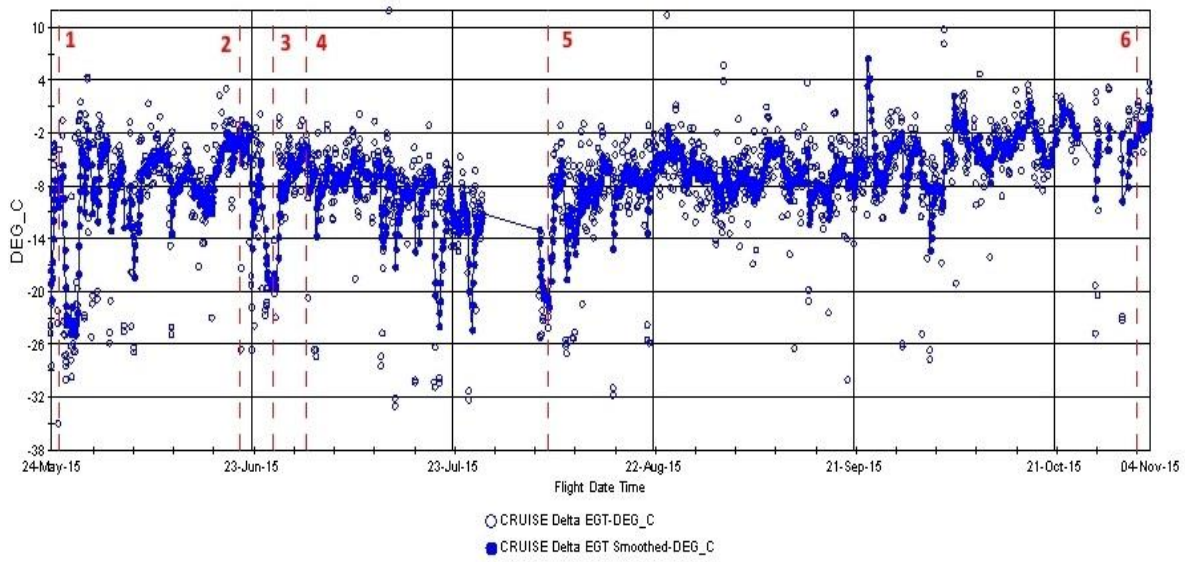
Slika 29. - Primjer poboljšanja EGTM pranjem motora na primjeru motora CFM56 zrakoplova tipa A320 [17]

Na zrakoplovu tipa Airbus A320 promatranog zračnog prijevoznika primjećena je povećana potrošnja goriva. Analizama je utvrđeno povećanje EGT koje je uzrokovalo veću potrošnju goriva. Tehničko osoblje zaduženo za održavanje motora, pranjem motora je smanjilo EGT na prihvatljive vrijednosti. Postignuto je poboljšanje EGTM od 13 °C. Pranje motora je

izvršeno za oba motora zrakoplova tipa Airbus A320. Motori su instalirani na zrakoplov i uočeno je poboljšanje u potrošnji goriva.

5.3.2. Utjecaj zamjene komponenti motora na performanse

Ukoliko se redovitim praćenjem stanja motora primjeti kvar određene komponente, potrebno ju je zamjeniti novom ili popraviti i ugraditi nazad na motor. Zamjena određenih komponenti također se smatra efikasnom mjerom održavanja motora. Utjecaj na performanse mlaznog motora zamjenom određenih komponenti prikazan je na slici 30. Graf prikazan na slici 30. prikazuje praćenje promjene margine u krstarenju (engl. *Cruise Delta EGT*) na motoru CFM56 na zrakoplovu tipa A320 u vremenskom periodu od 6 mjeseci u 2015. godini. Podaci su preuzeti od zračnog prijevoznika. [17] Prateći vrijednosti iskazane u stupnjevima Celzijusa, na mjestima označenim brojevima od 1 do 6 može se primjetiti manje ili više značajan pad margine.



Slika 30. - Utjecaj zamjene komponenti motora na promjenu margine u krstarenju na primjeru motora CFM 56 zrakoplova tipa A320 [17]

U prethodnim poglavljima je objašnjen utjecaj pada margine na performanse zrakoplovnog mlaznog motora. Kako bi se margina obnovila, učinjene su zamjene komponenti koje su prouzrokovale pad vrijednosti margine. Označeni brojevi predstavljaju zamjene sljedećih komponenti:

1./2. Senzor za praćenje prekoračenja temperature (engl. *Overtemperature leak switch)*

3. Pneumatski senzor tlaka (engl. *Pressure regulated transducer fin)*

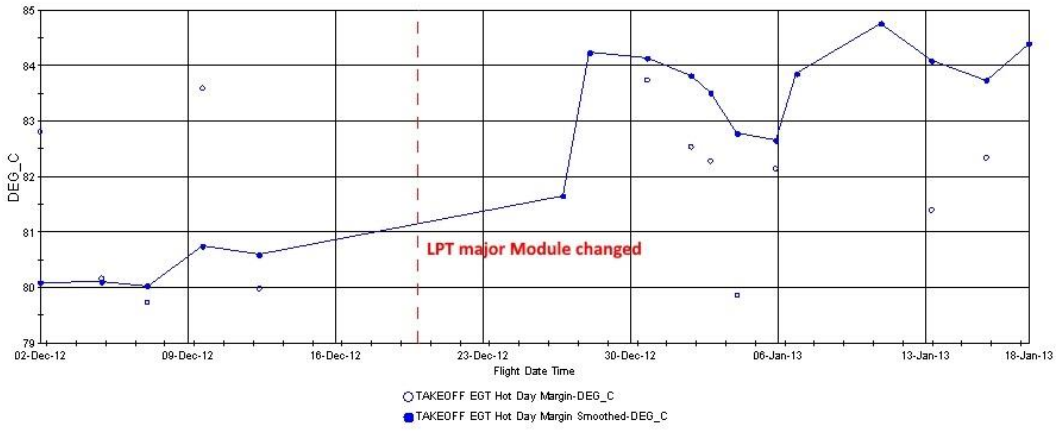
4. Visokotlačni ventil za zatvaranje (engl. *High pressure shutoff valve)*

5. Ventil regulacije tlaka niskotlačnog i visokotlačnog kompresora (engl. *Pressure regulation valve)*

6. Ventil za oduzimanje zraka na niskotlačnom kompresoru (engl. *LP bleed check valve)*

Nakon učinjene zamjene navedenih komponentni uočava se povećanje vrijednosti promjene margine u krstarenju. Ponovnim instaliranjem motora na zrakoplov uočena je efektivnija potrošnja goriva. Sve komponentne su se mijenjale zbog dotrajalosti.

Na slici 31. prikazan je utjecaj promjene niskotlačne turbine na EGTM na primjeru motora CFM56 zrakoplova tipa A320. Podaci su iz prosinca 2012. godine i preuzeti su od zračnog prijevoznika [17] te predstavljaju graf korišten za redovno praćenje EGTM. Pad vrijednosti EGTM tehničkom osoblju je ukazao na potrebu za promjenom niskotlačne turbine. Nakon spomenute zamjene tehničko osoblje je utvrdilo pozitivnu promjenu EGTM od otprilike +3°C.



Slika 31. - Utjecaj promjene niskotlačne turbine na EGTM na primjeru motora CFM56 zrakoplova tipa A320 [17]

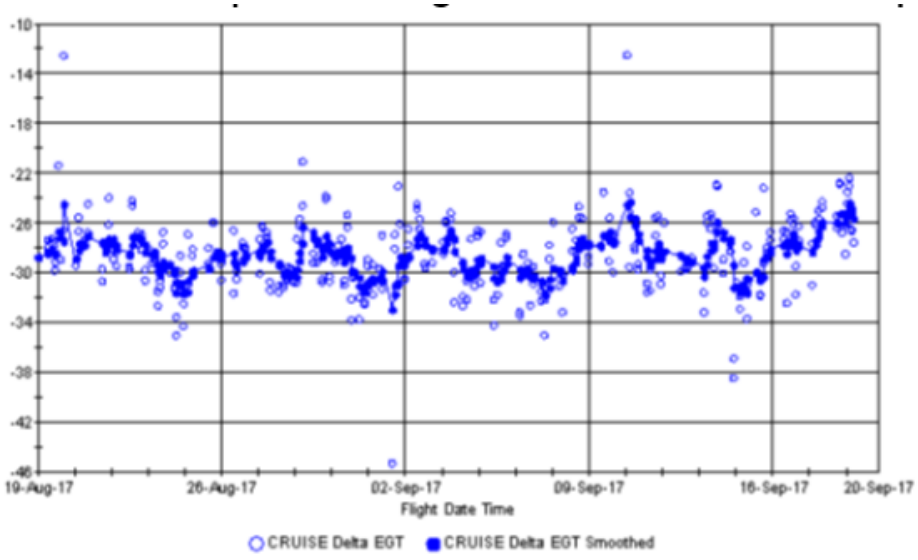
5.3.3. Utjecaj zamjene dijelova sustava za indikaciju performansi motora

Primjeri navedeni u ovom poglavlju predstavljaju neuobičajene promjene u ECTM parametrima motora. Ove promjene su uočene od strane proizvođača motora, a mjere su učinjene od strane zračnog prijevoznika čiji su podaci korišteni. [17] Svi primjeri su za motor CFM56 zrakoplova tipa Airbus A320.

U navedenim primjerima opisano je kako zamjena dijelova sustava za indikaciju performasi motora (npr. TAT indikator, EGT indikator, indikator temperature ulja) utječe na obnavljanje performansi motora.

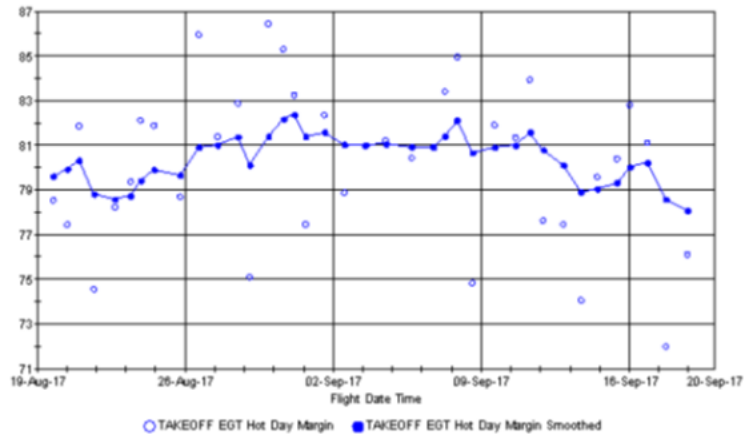
PRIMJER 1.

ECTM-om je zapaženo povećanje EGT-a. Prikaz promjene vrijednosti EGT-a prikazan je na slici 32. Sukladno tome, povećanje EGT-a je uzrokovalo smanjenje EGTM što je prikazano na slici 33. Navedene promjene su utjecale na povećanje *Delta Core speed* (slika 34.) i na smanjenje protoka goriva (engl. *Delta Fuel Flow*) (slika 35.). Podaci su preuzeti od zračnog prijevoznika. [17]

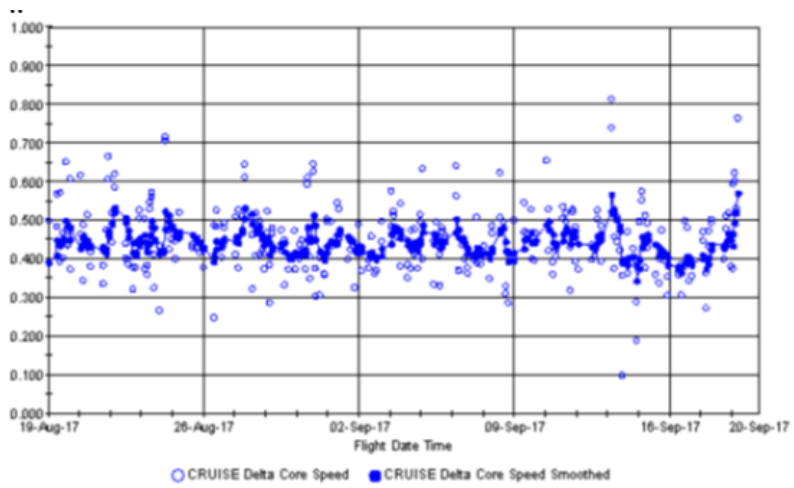


Slika 32. **-** Trend promjene vrijednosti EGT-a prije promjene TAT sondi [17]

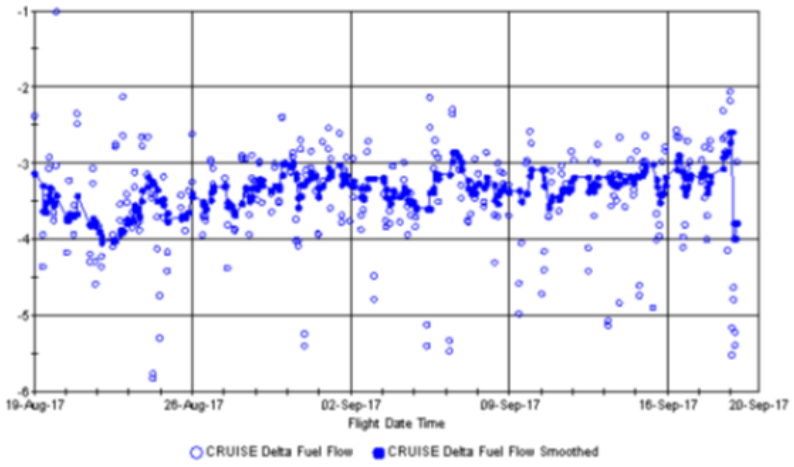
Slične promjene su uočene i na drugom motoru zrakoplova. Analizama, koje je obavio proizvođač motora, zaključeno je da je uzrok ovih promjena greška senzora za indikaciju ukupne temperature zraka (engl. *Total Air Temperature (TAT) sensor indication*). Zračni prijevoznik je analizama utvrdio da je greška u TAT sondama. Zamjenom TAT sondi svi parametri su imali poboljšane vrijednosti.



Slika 33. **-** Trend promjene vrijednosti EGTM prije promjene TAT sondi [17]



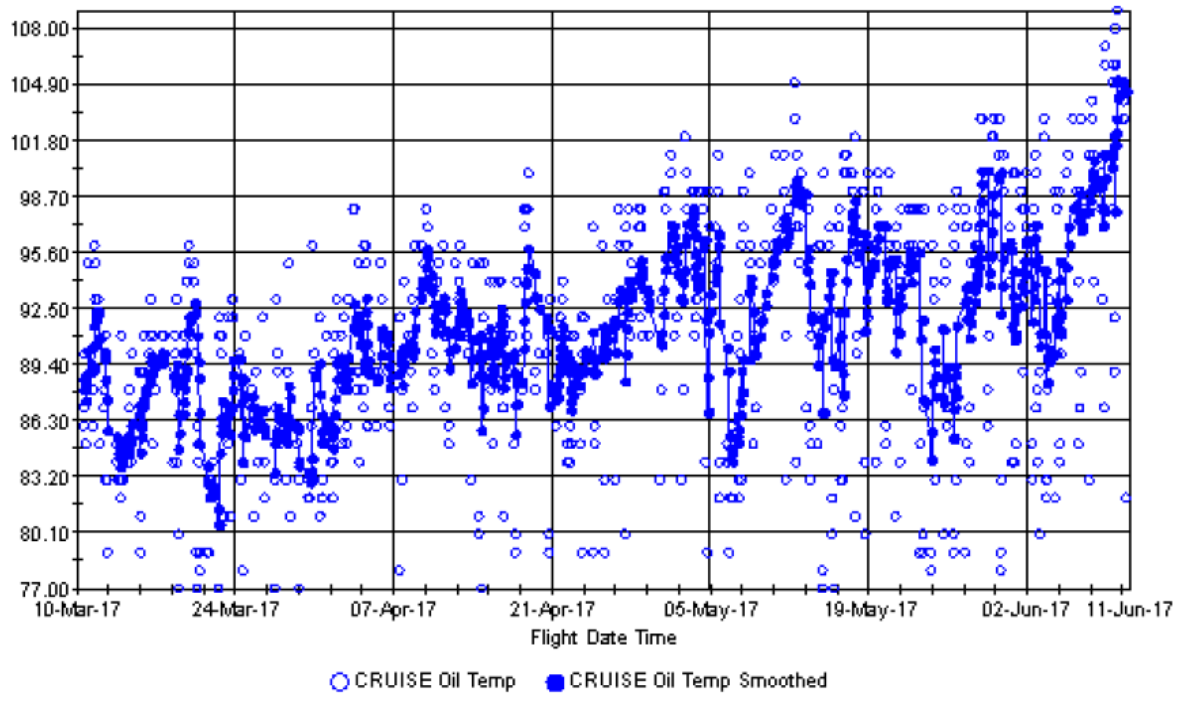
Slika 34. **-** Trend promjene vrijednosti Core Speed prije promjene TAT sondi [17]



Slika 35. **-** Trend promjene vrijednosti protoka goriva prije zamjene TAT sondi [17]

PRIMJER 2.

Proizvođač motora je uočio upozorenje o postepenom povećanju temperature ulja u krstarenju (engl. *Cruise Oil Temperature*) za motor broj 2 određenog zrakoplova tipa Airbus A320. Analizom je utvrđeno da je temperatura ulja postepeno rasla kroz nekoliko mjeseci. Na slici 36. je prikazana spomenuta promjena. [17]

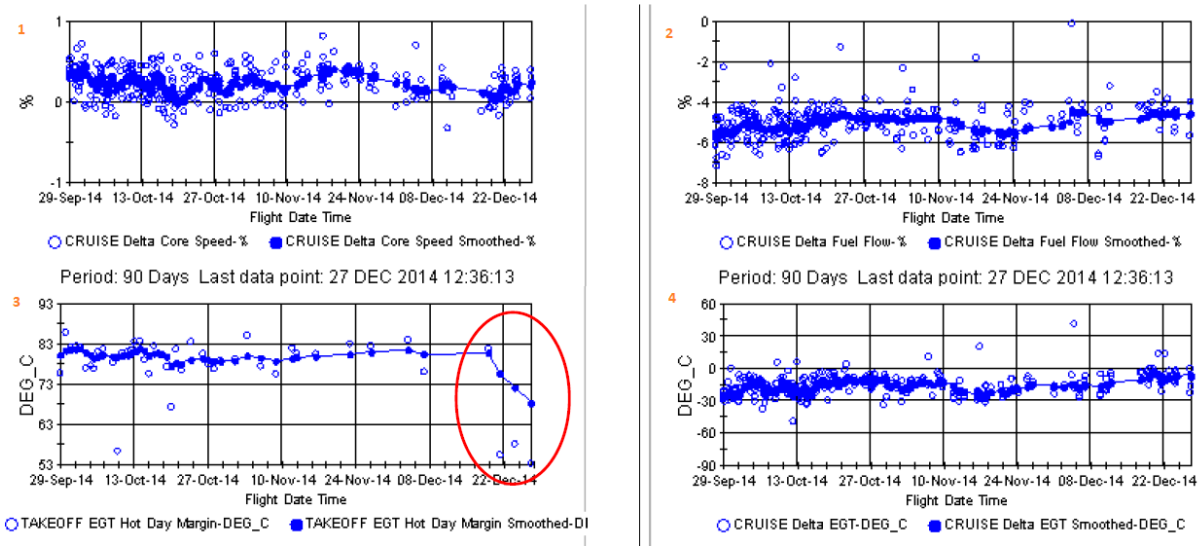


Slika 36. - Promjena temperature ulja u krstarenju kroz 4 mjeseca na primjeru CFM56 motora zrakoplova tipa A320 [17]

U periodu od 14. ožujka 2017. do 10. lipnja 2017. temperatura je porasla sa 84.87 °C do 105 °C što predstavlja promjenu od 20.13 °C. Pregledima električnog priključka nije uočeno nikakvo oštećenje, kontaminacije ili labavosti. Zračni prijevoznik je promjenio senzor za temperaturu ulja i trend se vratio u normalnu. Podaci su preuzeti od zračnog prijevoznika. [17]

PRIMJER 3.

Motor CFM56 na određenom zrakoplovu tipa Airbus A320 je imao značajno smanjenje EGTM uz stabilni trend vrijednosti *Cruise Delta EGT*, *Cruise Delta Core Speed* i protok goriva. Na slici 37. prikazan su grafovi koji opisuju navedeni odnos. Grafovi su preuzeti od zračnog prijevoznika. [17] Graf broj 1 prikazuje trend promjene *Cruise Delta Core Speed*, graf broj 2 prikazuje trend promjene protoka goriva, graf broj 3 prikazuje tren promjene EGTM, a graf broj 4 prikazuje trend promjene *Cruise Delta* EGT. Iz grafa 3 vidljiva je promjena EGTM od -15°C.



Slika 37. - Primjer pada EGTM pri stabilnim vrijednostima Cruise Delta EGT, Cruise Delta Core Speed i protoka goriva na CFM56 motoru zrakoplova tipa A320 [17]

Ovakav tip promjena trenda vrijednosti EGTM uz stabilne vrijednosti ostalih parametara ukazuje na grešku indikacije EGT. Promjenom senzora za indikaciju EGT trend vrijednosti vraćen je u stabilno stanje.

6. ZAKLJUČAK

Zrakoplovni mlazni motor može se zamisliti kao „organizam“ koji je potrebno kontrolirati jer s vremenom njegove performanse degradiraju, a dijelovi se troše i stare. S povećanjem zračnog prometa pojavila se potreba za kvalitetnijim i financijski isplativijim načinima održavanja zrakoplovnog mlaznog motora. Pojavom kontinuiranog praćenja stanja motora, zračni prijevoznici su dobili priliku smanjiti godišnje troškove koje su morali izdvajati za održavanja. Zrakoplovni motor se rastavlja s zrakoplova tek kada njegove performanse na to ukažu. Najznačajniji pokazatelj performansi motora je specifična potrošnja goriva. Praćenjem potrošnje goriva može se uočiti kvar određenog elementa motora. Ekvivalent potrošnji goriva je EGT – temperatura produkata izgaranja na izlasku iz turbine. Smatra se indikacijom kako efikasno motor proizvodi potisak. To je jedan od poznatijih parametara koji ukazuju na degradaciju određenog elementa motora. Svaki motor ima propisanu, odnosno maksimalnu dopuštenu temperaturu koja se ne smije prekoračiti (engl. *EGT Redline*). U slučaju prekoračenja može doći do oštećenja motora.

Svi dijelovi motora ne mogu na isti način stariti jer ne rade u jednakim uvjetima. Isto vrijedi i općenito za motore. Zračni prijevoznici s jednakim flotama mogu imati različite statistike vezane uz degradaciju jer ne vrše operacije u istim meteorološkim uvjetima i okolinama, nemaju jednaka letna opterećenja ili profile leta. Poznate su dvije vrste degradacija: kratkoročna i dugoročna degradacija performansi zrakoplovnog mlaznog motora. Kratkoročna se pojavljuje u prvih stotinu letova nakon prvog korištenja motora. Dugoročna degradacija performansi se događa akumuliranjem broja radnih sati zrakoplovnog mlaznog motora. Svi elementi trend degradacije imaju sličan. U prvih nekoliko ciklusa imaju nagli porast degradacije do uhodavanja, a nakon toga imaju stabilan porast degradacije. Proizvođači motora propisuju približni trend degradacije prema kojem zračni prijevoznici mogu pratiti rad svakog elementa.

U ovom radu istraženo je praćenje stanja motora s ciljem planiranja aktivnosti održavanja. Praćenjem i analiziranjem vrijednosti parametara može se predvidjeti kvar ili ga ukloniti. Proizvođači propisuju određene mjere koje olakšavaju posao tehničkom osoblju. Postoji nekoliko aktivnosti održavanja koje inicira zračni prijevoznik, a koje povoljno utječu na obnavljanje perormansi. U radu je proučavano kako pranje motora i zamjena određenih komponenti utječe na performanse zrakoplovnog mlaznog motora. Prema podacima preuzetim od zračnog prijevoznika napravljene su analize iz kojih se zaključilo da se pranjem motora može postići poboljšanje EGT i do 13°. [17] Ukoliko se redovitim praćenjem stanja motora

primjeti kvar određene komponente, potrebno ju je zamjeniti novom ili popraviti i ponovo ugraditi na motor. Zamjena određenih komponenti također se smatra efikasnom mjerom održavanja motora. Praćenjem EGT i protoka goriva prije i poslije zamjena kritičnih komponenti motora ustanovljeno je da se može postići smanjenje EGT-a i do 30°. [17] Sve analize su rađene na motoru CFM56 zrakoplova tipa Airbus A320.

Uštede u potrošnji goriva koje se mogu postići redovitim praćenjem stanja motora i pravovremenim održavanjem iznose između 25 i 30%. Uz financijsku isplativost potrebno je istaknuti i razinu sigurnosti koja se također povećava.

LITERATURA

[1] EXPLAINTHATSTUFF. Preuzeto sa: https://www.explainthatstuff.com/jetengine.html [Pristupljeno: kolovoz 2018.].

[2] Bazijanac E. Zrakoplovni mlazni motori. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti; 2008.

[3] GAS-TURBINES-WEEBLY. Preuzeto: https://gas-turbines.weebly.com/turbine-assembly.html [Pristupljeno: rujan 2018.]

[4] Ackert S. Managing Technical Aspects of Leased Assets. Madrid: Jackson Square Aviation; 2015.

[5] Lakshminarasimha AN, Boyce MP, Meher-Homji CB. Modelling and Analysis of Gas Turbine Performance Deterioration. New York: The American Society of Mechanical Engineers; 1992.

[6] Bazijanac E. Tehnička eksploatacija i održavanje zrakoplova. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti; 2007.

[7] MRO-NETWORK. Preuzeto sa: https://www.mro-network.com/technology/wireless-sensors-increase-aircraft-system-monitoring-possibilities [Pristupljeno: kolovoz 2018.]

[8] Sallee GP. Performance deterioration based on existing (historical) data. Cleveland: NASA Lewis Research Center.

[9] Seymour P. An Introduction to Conducting Engine Maintenance. IBA Analysis – Engine Maintenance and EGT Margin; 2011.

[10] Hutter I. Engine Deterioration and Maintenance Action. Montreal; 2006.

[11] Ebmeyer C, Friedrichs J, Wensky T, Zachau U. Evaluation of total engine performance degradation based on modular efficiencies. Vancouver; 2011.

[12] Yu T, Scanlan J. System Integration: Maintenance cost, Deterioration and Performance Modelling of Jet Engines. Southampton: UTC for Computational Engineering.

[13] Cruz Ribeiro S. Implementation of an Engine Condition Monitoring tool for Airbus Aircraft. Lisabon: Instituto Superior Tecnico; 2015.

[14] Kraft J. Lufthansa Technik. Hamburg: 9th Annual Engine Conference.

[15] Chungang Q, Hongbo P. Study on the Life Estimation of Civil Aviation Engine. Tianjin, China; College of Aeronautical Engineering; 2015.

[16] Joosung JL. Historical and Future Trends in Aicrfat Performance, Cost and Emissions. Massachusetts; 2000.

[17] Konzultacije s tehničkim osobljem zračnog prijevoznika Croatia Airlines, Odjel održavanja zrakoplovnih motora, rujan 2018.

POPIS KRATICA

APU	(Auxiliary Power Unit) pomoćna jedinica za napajanje
DOP	(Cruise Delta Oil Pressure) tlak ulja
ECTM	(Engine Condition Trend Monitoring) praćenje stanja parametara motora
EGT	(Exhaust Gas Temperature) temperatura produkata izgaranja na ulazu u turbinu
EGTM	(Exhaust Gas Temperature Margine) EGT margina
EPR	(Engine Pressure Ratio) omjer ukupnih tlakova motora
FADEC	(Full Authority Digital Engine Control) sustava motorskih računala
FH	(Flight Hours) sati leta
FOD	(Foreign Object Damage) oštećenje stranim objektom
FT/SEC	(Feet per second) stopa u minuti
HPC	(High Pressure Compressor) visokotlačni kompresor
HPT	(High Pressure Turbine) visokotlačna turbina
ITT	(Interstage Turbine Temperature) temperatura između visokotlačne i niskotlačne turbine
LLP	(Life-Limited Parts) elementi s ograničenim radnim vijekom
LP	(Low Pressure) niskotlačno
OAT	(Outside Air Temperature) vanjska temperatura zraka
RPM	(Revolutions per minute) okretaji u minuti
SFC	(Specific Fuel Consumption) specifična potrošnja goriva
TAT	(Total Air Temperature) ukupna temperatura zraka
TSFC	(Thrust Specific Fuel Consumption) specifična potrošnja goriva po potisku

POPIS SLIKA

Slika 1. - Dijelovi mlaznog motora [1] 3
Slika 2. - Promjena parametara radne tvari u mlaznom motoru [3] 4
Slika 3. - Shematski prikaz vratila koje povezuje kompresor i turbinu 5
Slika 4. - Primjer EGT margine [4] 8
Slika 5. - Praćenje promjene EGT margine povećanjem broja ciklusa [4] 12
Slika 6. - Praćenje EGTM za oba motora A320 [17] 12
Slika 7. - Prikaz senzora u zrakoplovnom mlaznom motoru [7] 13
Slika 8. - Potrošnja goriva u periodu od 30 dana motora A320 [17] 14
Slika 9. - Primjer prikaza greške u protoku goriva na primjeru motora zrakoplova A320 [17] 15
Slika 10. - Promjena količine metalnih čestica u ulju kroz vrijeme [6] 16
Slika 11. - Praćenje promjene tlaka ulja na motoru zrakoplova tipa A320 [17] 16
Slika 12. - Praćenje razine vibracija na motoru zrakoplova tipa A320 [17] 17
Slika 13. - Prikaz uzroka povećanje potrošnje goriva 20
Slika 14. - Promjena EGT degradacije s povećanjem broja ciklusa [4] 20
Slika 15. - Utjecaj okoline na degradaciju performansi motora [11] 22
Slika 16. - Iznos TSFC-a prije i poslije popravka [8] 23
Slika 17. - Utjecaj na obnavljanje TSFC-a [8] 24
Slika 18. - Promjena EGT margine s brojem ciklusa [10] 26
Slika 19. - Odnos EGT margine novog motora i motora nakon većeg broja ciklusa 26
Slika 20. - Promjena EGTM s povećanjem broja ciklusa za motor tipa CFM56-7B [4] 27
Slika 21. - Utjecaj trošenja HPT na EGT na motoru CFM56 zrakoplova tipa A320 [17] 28
Slika 22. - Utjecaj trošenja HPT na protok goriva na motoru CFM56 zrakoplova tipa A320 [17] 28
Slika 23. - Primjer smanjenja EGT margine do minimalne vrijednosti prije posjeta radionice [12] 29
Slika 24. - Slijed praćenja stanja motora i primjenjivanja mjera održavanja 30
Slika 25. - Komponente s ograničenim radnim vijekom [6] 31
Slika 26. - Uzroci servisiranja motora ovisno o vrsti operacija zrakoplova [4] 32
Slika 27. - Utjecaj održavanja motora na EGTM i SFC [14] 33
Slika 28. - Prikaz utjecaj pranja motora na EGTM na motoru CFM56 zrakoplova tipa A320 [13] 35

Slika 29. - Primjer poboljšanja EGTM pranjem motora na primjeru motora CFM56 zrakoplova tipa A320 [17] 35
Slika 30. - Utjecaj zamjene komponenti motora na promjenu margine u krstarenju na primjeru motora CFM 56 zrakoplova tipa A320 [17] 36
Slika 31. - Utjecaj promjene niskotlačne turbine na EGTM na primjeru motora CFM56 zrakoplova tipa A320 [17] 37
Slika 32. - Trend promjene vrijednosti EGT-a prije promjene TAT sondi [17] 38
Slika 33. - Trend promjene vrijednosti EGTM prije promjene TAT sondi [17] 39
Slika 34. - Trend promjene vrijednosti Core Speed prije promjene TAT sondi [17] 39
Slika 35. - Trend promjene vrijednosti protoka goriva prije zamjene TAT sondi [17] 39
Slika 36. - Promjena temperature ulja u krstarenju kroz 4 mjeseca na primjeru CFM56 motora zrakoplova tipa A320 [17] 40
Slika 37. - Primjer pada EGTM pri stabilnim vrijednostima Cruise Delta EGT, Cruise Delta Core Speed i protoka goriva na CFM56 motoru zrakoplova tipa A320 [17] 41

POPIS TABLICA

Tablica 1. - Primjer pretpostavljenih uzroka s obzirom na promjenu parametara za motor CFM56 33

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj diplomski rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako 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 diplomskog rada pod naslovom **Utjecaj održavanja na performanse zrakoplovnog mlaznog motora**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 19-09-18

Student/ica:
J. Jurjević
(potpis)