

Održavanje pogonskog sustava helikoptera Mil Mi 171sh praćenjem radnih parametara

Kamauli, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:119:963596>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH
ZNANOSTI

Marko Kamauli

**Održavanje pogonskog sustava helikoptera Mil Mi 171sh praćenjem
radnih parametara**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2023.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU FAKULTET
PROMETNIH ZNANOSTI POVJERENSTVO
ZA DIPLOMSKI ISPIT**

Zagreb, 9. ožujka 2023.

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

DIPLOMSKI ZADATAK br. 6932

Pristupnik: **Marko Kamauli (0268031472)**
Studij: **Aeronautika**

Zadatak: **Održavanje pogonskog sustava helikoptera Mil Mi 171sh praćenjem radnih parametara**

Opis zadatka:

Opisati konstrukcijske i eksploatacijske značajke pogonskog sustava helikoptera Mil Mi 171sh te prikaz održavanja. Usporediti sadašnji sustav održavanja s zapadnim tipom održavanja. Nakon usporedbe s metodama održavanja praćenjem radnih parametara motora (Engine Condition Trend Monitoring) dati prijedloge za poboljšanje sustava održavanja.

Zadatak uručen pristupniku: 19. travnja 2022. Rok
za predaju rada: 9. ožujka 2023.

Mentor:

prof. dr. sc. Ernest Bazijanac

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

DIPLOMSKI RAD

**ODRŽAVANJE POGONSKOG SUSTAVA HELIKOPTERA MIL MI 171SH
PRAĆENJEM RADNIH PARAMETARA
MAINTENANCE OF THE MIL MI 171SH HELICOPTER POWERPLANT
BASED ON OPERATING PARAMETERS MONITORING**

Mentor: Prof. dr. sc. Ernest Bazijanac

Student: Marko Kamauli
JMBAG: 0268031472

SAŽETAK

Proces održavanja zrakoplova je ključan faktor eksploatacije i održavanja sigurnosti i plovidbenosti. Koncepti održavanja su se kroz godine mjenjali, te je prvotni oblik održavanja bio tzv. 'Hard Time' oblik. Taj način podrazumjeva zamjenu komponenti u fiksnim intervalima vremena koje određuje proizvođač zrakoplova, definiranim u satima leta ili satima rada ili ciklusima rada. Kroz godine razvitka zrakoplovstva razvijen je koncept praćenja radnih parametara. Taj koncept omogućava smanjenja troškova održavanja i povećanja resursa zrakoplova i njegovih komponenti. Primarno je primjenjen u civilnom zrakoplovstvu, a počeo se primjenjivati i u vojnom zrakoplovstvu zapadnih zemalja. Hrvatsko ratno zrakoplovstvo raspolaže helikopterima *Mil Mi171sh*, koji se održavaju po 'Hard Time' principu. U ovom radu istražuju se mogućnosti primjene tog pristupa na dani helikopter.

Ključne riječi: Pogonski sustav, Održavanje, Praćenje radnih parametara.

SUMMARY

The process of aircraft maintenance is one of key factors in maintaining aircraft airworthiness, safety in its lifetime of exploitation. The concepts of aircraft maintenance have evolved during the years, the first of whom has been the 'Hard Time' concept. This concept estimates the time of replacement of individual components in a time interval determined by the aircraft manufacturer, defined in: aircraft flight hours, aircraft cycles, and hours of operation. As the years passed, a new concept was designed, maintenance by monitoring of the working parameters. This concept enables the reduction of the cost of maintenance and improves aircraft reliability. It is primarily used in civil aviation, and is being introduced by western air forces. The Croatian Air Force operates the Mil Mi171sh helicopter, maintained by the 'Hard Time' method. This thesis investigates the possibility of maintaining this helicopter with the Trend monitoring concept

Key words: Maintenance, Engine condition monitoring, Powerplant

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. OPIS POGONSKE GRUPE HELIKOPTERA <i>MIL MI 171SH</i> | 2 |
| 2.1 Opis konstrukcije motora <i>TV3-117</i> | 2 |
| 2.2 Opis komponenti motora <i>TV3-117</i> | 5 |
| 2.2.1 Usisnik motora <i>TV3-117</i> | 5 |
| 2.2.2 Kompresor..... | 6 |
| 2.2.3 Komora izgaranja..... | 8 |
| 2.2.4 Turbine i ispušna grana..... | 9 |
| 2.3 Dijelovi pokretani reduktorom | 10 |
| 2.4 Karakteristike i režimi rada motora..... | 11 |
| 2.4.1 Režim poljetanja..... | 12 |
| 2.4.2 Nominalni režim | 12 |
| 2.4.3 Krstareći režim..... | 12 |
| 3. METODE ODRŽAVANJA POGONSKOG SUSTAVA <i>MIL MI 171SH</i> | 13 |
| 3.1 Specifičnosti održavanja pogonskog sustava <i>Mi171sh</i> | 14 |
| 3.1.1 Redovno održavanje motora <i>TV3-117</i> | 14 |
| 3.1.2 Izvanredno održavanje motora <i>TV3-117</i> | 15 |
| 4. PRIKAZ ODRŽAVANJA PRAĆENJEM RADNIH | 17 |
| PARAMETARA | 17 |
| 4.1 Osnovni postupci održavanja praćenjem parametara | 17 |
| 4.1.1 Prikupljanje podataka za vrijeme leta..... | 17 |
| 4.1.2 Model obrade podataka | 18 |
| 4.1.3 Obrada podataka | 19 |
| 4.1.4 Grafički prikaz rezultata mjerenja | 20 |
| 4.1.5 Definiranje referentne linije parametara..... | 20 |
| 4.2 Metode praćenja radnih parametara | 21 |
| 4.2.1 Praćenje parametara rada motora | 21 |
| 4.3 Metode praćenja radnih parametara | 24 |
| 4.3.1 Vibracijska analiza..... | 24 |
| 4.3.2 Analiza ulja | 25 |
| 4.4 Metode otkrivanja kvarova nakon provedene analize parametara | 26 |
| 4.4.1 Vizualna metoda..... | 26 |
| 4.4.2 Penetrantska metoda | 27 |

| | |
|--|----|
| 4.4.3 Magnetska metoda..... | 28 |
| 4.4.4 Ispitivanje radiografijom..... | 29 |
| 4.4.5 Ispitivanje ultrazvukom..... | 30 |
| 4.4.6 Metode vrtložnih struja | 30 |
| 5. PRIMJER ODRŽAVANJA PRAĆENJEM RADNIH PARAMETARA NA MOTORIMA <i>PRATT & WHITNEY CANADA</i> SERIJE <i>PW100</i> I <i>PT6</i> | 32 |
| 5.1 Motor serije <i>PW100</i> | 32 |
| 5.2 Motor serije <i>PT6</i> | 33 |
| 5.3 Dijagnostika stanja motora na temelju praćenja parametara radnog procesa | 33 |
| 5.3.1 Stanje kompresora..... | 33 |
| 5.3.2 Stanje komore izgaranja i turbina | 35 |
| 5.4 Primjer sustava korištenog za <i>ECTM</i> tvrtke <i>ALTAIR</i> | 37 |
| 6. PRIJEDLOZI POBOLJŠANOG PROGRAMA ODRŽAVANJA NA TEMELJU PODATAKA IZ ISTRAŽIVANJA..... | 38 |
| 6.1 Primjenjivost održavanja praćenjem radnih parametara na helikopter <i>Mi171sh</i> i njegovu pogonsku grupu..... | 38 |
| 6.2 Praćenje parametara stanja <i>Mi171sh</i> sa sustavom <i>GPMS Foresight MX</i> | 40 |
| 6.3 Primjenjivost održavanja praćenjem radnih parametara na motoru <i>TV3 – 117</i> | 41 |
| 6.4 Prijedlozi poboljšanog plana održavanja komponenti pogonske grupe helikoptera <i>Mil Mi 171sh</i> | 42 |
| 6.4.1 Praćenje stanja usisnika i kompresora..... | 42 |
| 6.4.2 Praćenje stanja komore izgaranja | 42 |
| 6.4.3 Praćenje stanja turbina | 43 |
| 6.4.4 Praćenje stanja sustava za ubrizgavanje goriva i podmazivanje | 43 |
| 6.4.5 Praćenje stanja komponenti pokretanih reduktorom | 44 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 45 |
| 8. POPIS LITERATURE | 46 |
| 9. POPIS SLIKA..... | 48 |
| 10. POPIS TABLICA..... | 50 |
| 11. POPIS KRATICA..... | 51 |

1. UVOD

Mil Mi 171sh je s preko 10 000 proizvedenih helikoptera najproizvođeniji helikopter na svijetu, te je oslonac teretnog prijevoza u HRZ-u. Pojavio se u civilnim i vojnim varijantama te je svojom robusnošću i sposobnošću rada u najekstremnijim uvjetima neophodan za mnoge aktivnosti raznih vojnih i civilnih organizacija.

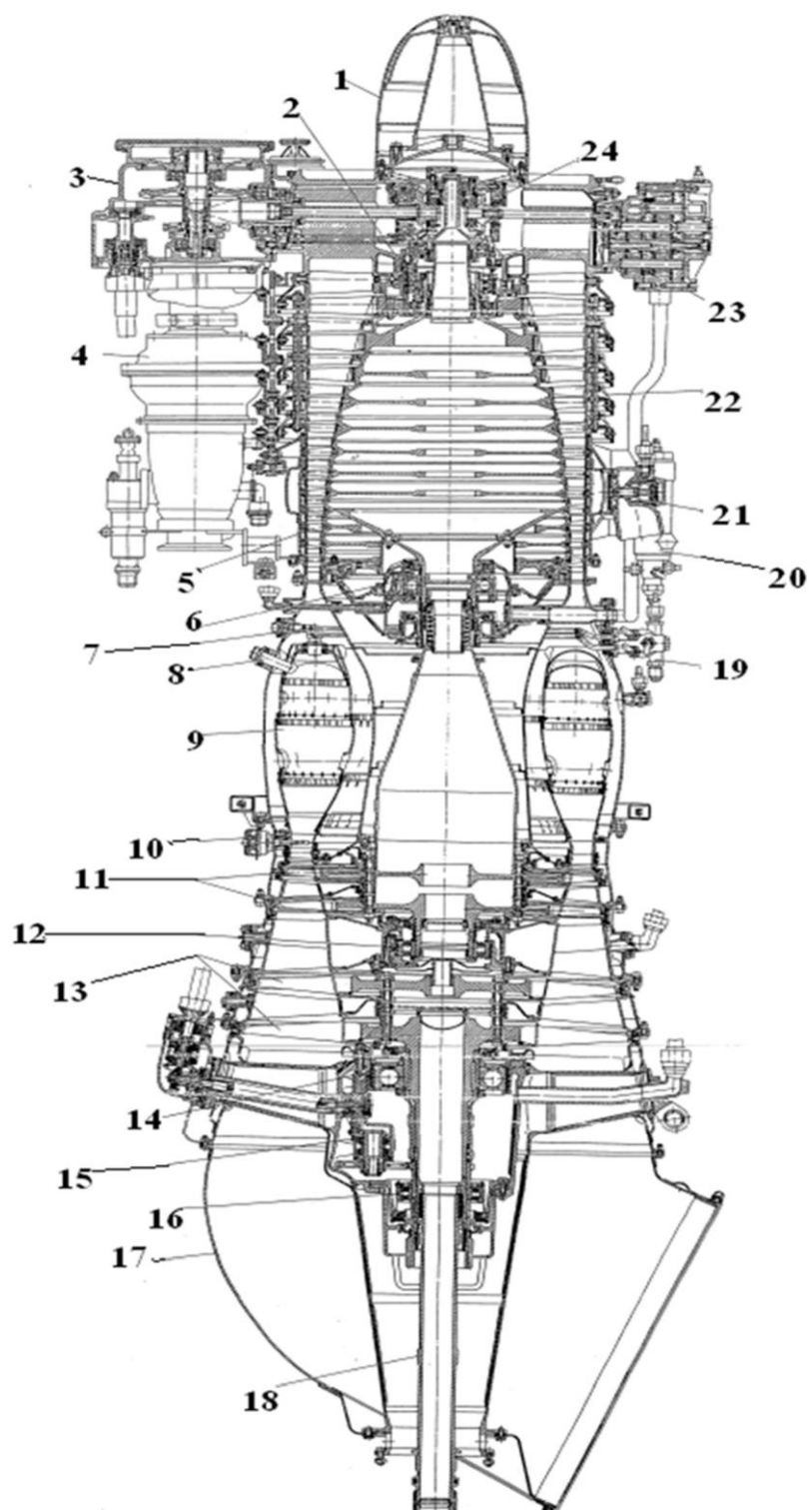
Na osnovu tehnološke razine procjenjuje se da bi se ovi helikopteri mogli koristiti još 15 godina, te se u aspektu svakodnevne eksploatacije osim letačkog aspekta treba u obzir uzeti i aspekt održavanja zrakoplova. Naime zrakoplovi HRZ-a se održavaju po takozvanom '*Hard time*' principu, gdje su redovni intervali održavanja definirani striktnim vremenskim rokom. Međutim, u svijetu civilnog zrakoplovstva postoji i održavanje praćenjem radnih parametara. Ono podrazumjeva konstantno praćenje radnih parametara, te kad neki od njih odstupa od tolerancije, dio se zamjenjuje ili popravlja. Na ovaj način osigurano je smanjenje troškova samog održavanja i povećanje sigurnosti.

U ovome će se radu prikazati dosadašnje metode održavanja pogonskog sustava helikoptera. Također će se prikazati metode održavanja po stanju. Usporedbom obiju metoda prikazat će se prednosti programa održavanja praćenjem radnih parametara, te stvoriti plan održavanja za pogonski sustav danog helikoptera. U 2. poglavlju prikazuju se konstrukcija motora *TV3-117* te njegovi parametri performansa. U 3. poglavlju prikazuje se trenutačna metodologija održavanja dane pogonskog sustava. Četvrto poglavlje prikazuje model održavanja praćenjem radnih parametara. U 5. Poglavlju se prikazuje održavanje praćenjem radnih parametara na primjerima motora *PT6* i *PW100* koji se koriste u HRZ-u, dok se u zadnjem poglavlju prikazuju mogućnosti i prednosti tog načina održavanja na danom pogonskom sustavu.

2. OPIS POGONSKE GRUPE HELIKOPTERA MIL MI 171SH

2.1 Opis konstrukcije motora TV3-117

Helikopter Mil Mi 171sh pogonjen je dvama motorima tipa *Klimov TV3-117*. Oni su turbovratilni motori, te su u izvedbi motora sa slobodnom turbinom. Na slici 1 je prikazana kinematska shema samog motora. Motori helikoptera *Mi 171sh* su u potpunosti jednaki, te se razlikuju jedino u orijentaciji ispušne cijevi. Kao što je i prije navedeno i u shemi vidljivo, motor je u izvedbi sa slobodnom turbinom. Primarna prednost izvedbe sa slobodnom turbinom je ta što se može ostvariti zasebna brzna vrtnje turbine koja pokreće reduktor i turbine koja pokreće kompresor samog motora. Time je još i eliminirana potreba za frikcijskom spojkom koja se koristi prilikom pokretanja, olakšano je pokretanje kompresora, te je smanjena potrošnja goriva kroz promjenu režima rada motora. U dolje navedenoj tablici i shemi brojevima na kinematskoj shemi se pridružuje komponenta koju on prikazuje.[1]



Slika 1. – Kinematska shema motora TV3-117[1]

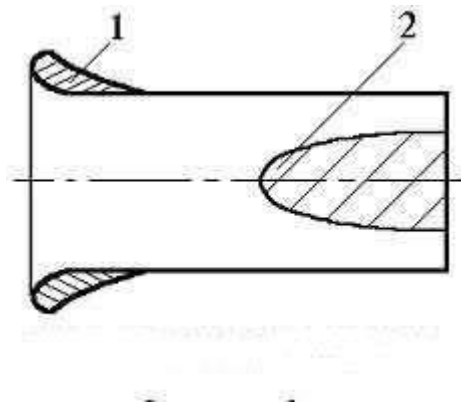
| | |
|----|--|
| 1 | Usisni konus sa spojem za montažu |
| 2 | Prvi potporanj za ugradnju |
| 3 | Reduktor za pomoćne sustave |
| 4 | Zračni starter |
| 5 | Kompresor |
| 6 | Drugi potporanj za ugradnju |
| 7 | Cjevovod za gorivo i glavne brizgaljke |
| 8 | Svijećica |
| 9 | Komora izgaranja |
| 10 | Termoelektrični senzor |
| 11 | Turbina kompresora |
| 12 | Treći potporanj za ugradnju |
| 13 | Slobodna turbina |
| 14 | Četvrti potporanj za ugradnju |
| 15 | Regulator brzine slobodne turbine |
| 16 | Peti potporanj za ugradnju |
| 17 | Ispušna cijev |
| 18 | Torziono vratilo |
| 19 | Ventil za drenažu |
| 20 | Hidraulički cilindar |
| 21 | Ventil za odvođenje zraka |
| 22 | Spojevi za EGV kontrolu |
| 23 | Niži blok pumpe za ulje |
| 24 | Reduktor za unutanje sustave |

Tablica 1.- Prikaz komponenti motora *TV3-117*[1]

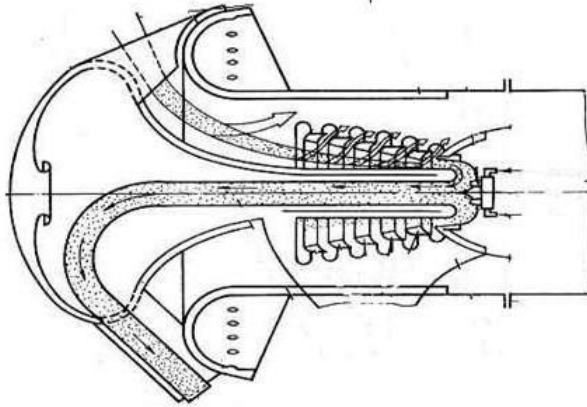
2.2 Opis komponenti motora *TV3-117*

2.2.1 Usisnik motora *TV3-117*

Usisnik motora *TV3-117* sastoji se od dva dijela: unutarnjeg i vanjskog. Vanjski dio usisnika je dio konstrukcije samog helikoptera, dok je zadnji dio usisnika dio konstrukcije samog motora. Također sadrži senzore za tlak i brzinu zraka, te uređaje za detektiranje zagušenosti zraka, pri čijoj aktivaciji dolazi do gašenja motora. [1] U uvjetima rada s visokom koncentracijom pijeska u zraku, na usisnik se može nadograditi pročistač zraka



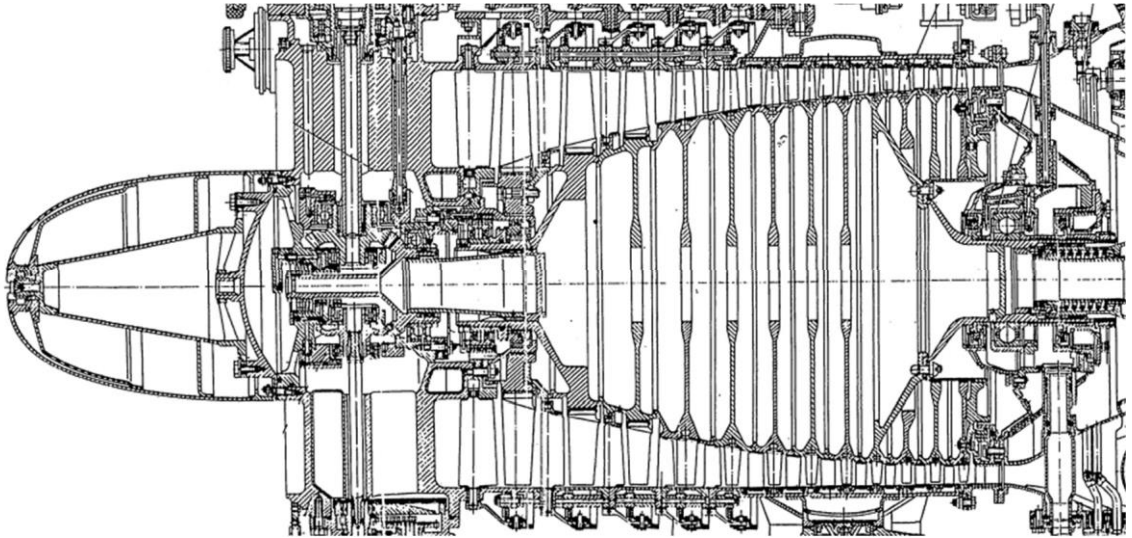
Slika 2. - Prikaz usisnika motora *TV3-117*: 1- usne usisnika, 2- usisni konus[2]



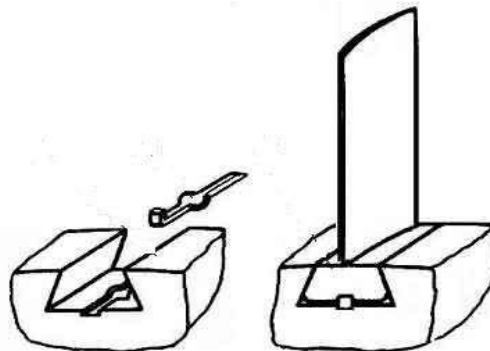
Slika 3. – Pročistač zraka motora *TV3-117*

2.2.2 Kompresor

Kompresor motora *TV3-117* je aksijalni i sastoji se od 12 stupnjeva. Statorske lopatice su na prva četiri stupnja imaju mogućnost promjene nagibnog kuta, a na sedmom stupnju kompresora nalaze se protupumpažni ventili. Na kraju kompresora nalazi se difuzor za smanjenje ulazne brzine zraka u komoru izgaranja. Statori i rotori su izrađeni od titanovih legura, štampanjem iz lima. Diskovi rotora su spojeni varenjem, osim diska prvog rotora koji je spojen vijcima. Na slici 4 je prikazan presjek kompresora, a na slici 5 prikazan je način pričvršćivanja lopatica na disk. [1]



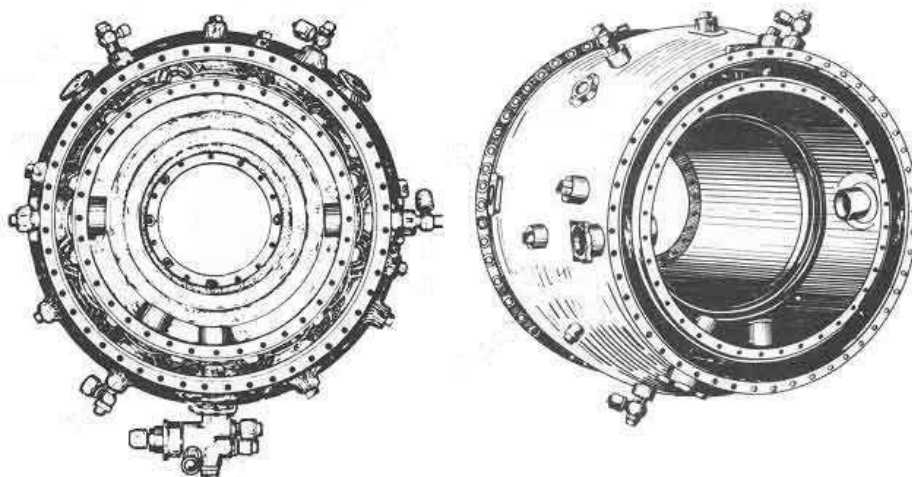
Slika 4.- Shema kompresora motora TV3-117[2]



Slika 5. – Prikaz utora za učvršćenje lopatica na disk[2]

2.2.3 Komora izgaranja

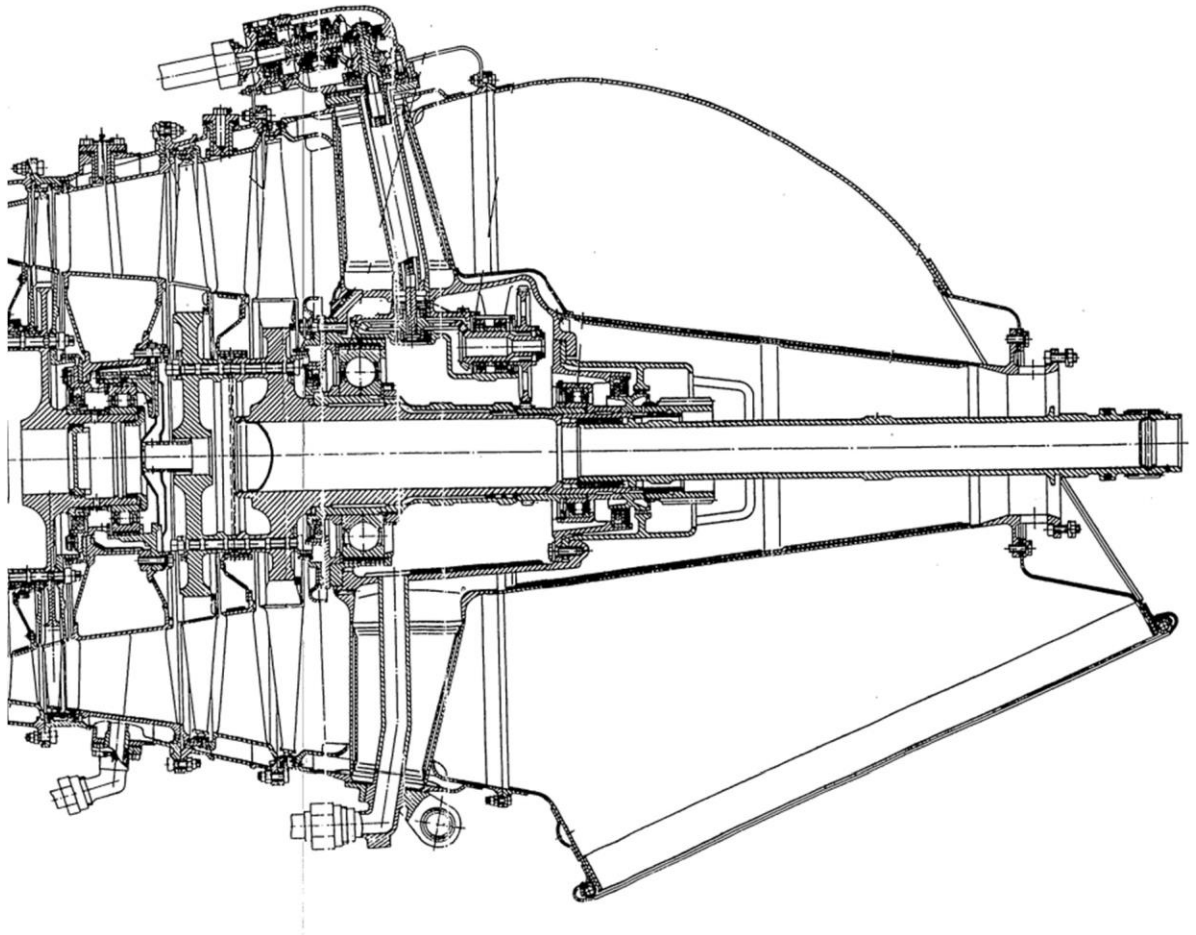
Komora izgaranja na ovom motoru je prstenaste konstrukcije. Protok zraka prije ulaska u komoru izgaranja dijeli se na dva dijela, dio koji ide direktno u komoru te sudjeluje u procesu izgaranja s gorivom, te dio koji se kreće oko komore, te služi za hlađenje komore i smanjenje produkata izgaranja koji dolaze na turbinu. Plamena cijev je prstenastog tipa. Vanjski i unutarnji dio plamene cijevi je spojen prstenovima te ima devet mjesta za učvršćenje. Hlađenje radnog medija prije dolaska na turbinu se ostvaruje mješanjem struje hladnog zraka. Komora ima dvije svijećice i sadrži ventil za drenažu. Komora sadrži 12 brizgaljki za ubrizgavanje goriva u motor. [1]



Slika 6. – Komora za izgaranje motora *TV3-117*[2]

2.2.4 Turbine i ispušna grana

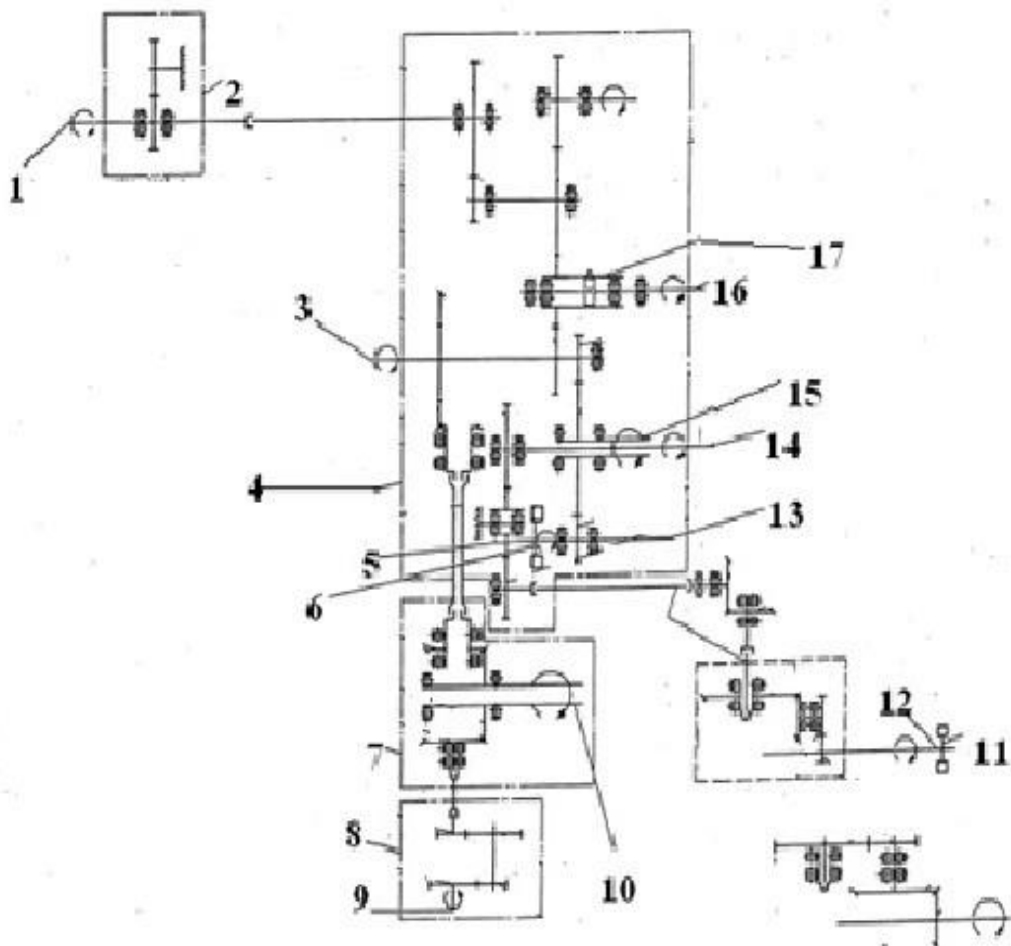
Na danome motoru nalazimo dvije dvostupanjske turbine, jedna za pokretanje kompresora, te jedna za pokretanje izlaznog vratila. [1]



Slika 7. - Prikaz turbine i ispušne grane na motoru[2]

2.3 Dijelovi pokretani reduktorom

Na navedenom motoru pomoću reduktora pokreću se dijelovi koji su neophodni za upravljanje motorom i letjelicom. Reduktor služi kao sredstvo koje po potrebi specifičnog izlaza smanjuje brzinu vrtnje zasebnih vratila koje ih pokreću te tako osigurava siguran i efikasan rad danih komponenti. U nastavku ovog dijela priložena je kinematska shema reduktora motora *TV3-117* te su u navedenoj tablici nabrojane komponente koje se pokreću njime. [1]



Slika 8.- Prikaz dijelova pokretanih reduktorom[1]

| | |
|----|--|
| 1 | Spoj za generator (N= 2500 RPM) |
| 2 | Spoj za crpku koja crpi ulje iz kartera |
| 3 | Slobodno mjesto za spoj (N= 9000 RPM) |
| 4 | Slobodno mjesto za spoj |
| 5 | Centrifugalna pumpa za gorivo (N=6500 RPM) |
| 6 | Spoj za DTB senzor |
| 7 | Spoj za elemente koji se mogu dodati, nema redukcije, tj vrti se brzinom vrtnje kompresora |
| 8 | Spoj za blok crpke ulja |
| 9 | Spoj za crpku ulja (N= 5800 RPM) |
| 10 | Spoj za pričvršćivanje i pogonjenje reduktora s motorom (N= 19 500 RPM) |
| 11 | Spoj za DTB senzor |
| 12 | Vratilo slobodne turbine (N= 15 000 RPM) |
| 13 | Spoj za ručno zakretanje motora |
| 14 | Spoj za mjerač okretaja slobodne turbine |
| 15 | Spoj za postavljanje FCU-a (N= 4000RPM) |
| 16 | Spoj za ugradnju zračnog startera |
| 17 | Spoj za ugradnju kvačila koje služi za odspajanje motora od reduktora u slučaju prevelike brzine vrtnje glavnog rotora |

Tablica 2.- Prikaz komponenti pokretanih reduktorom[1]

2.4 Karakteristike i režimi rada motora

U standardnim uvjetima, te s uključenim sustavom za odprašivanje motor TV3-117 ima sljedeće performanse:[2]

| | |
|---------------------------------------|-------------------|
| Poletni režim | 1545 kW |
| Nominalni režim | 1250 kW |
| Prvi krstareći režim | 1103 kW |
| Drugi krstareći režim | 883 kW |
| Samoodrživi režim | Ne više od 147 kW |
| Maksimalni protok zraka | 9.7 kg/s |
| Stupanj povišenja tlaka | 9.9 |
| Masa „suhog“ motora: | 285 kg |
| Dužina s agregatima i ispušnom cijevi | 2055 mm |

| | |
|--------|--------|
| Širina | 650 mm |
| Visina | 728 mm |

Tablica 3.- Prikaz karakteristika motora i dodatnih tehničkih svojstava

2.4.1 Režim poljetanja

Režim poljetanja je režim u kojem motor proizvodi svoju maksimalnu snagu. On je kod ovog tipa motora ograničen iz sigurnosnih razloga na vrijeme od 6 minuta rada u kontinuitetu. Koristi se u situacijama: poljetanja, lebdenja, leta na velikim visinama, leta pri maksimalnom opterećenju, leta pri visokoj temperaturi i u situacijama pri kojima se dogodio otkaz jednog motora. Ograničenje u trajanju od 6 minuta postavljeno je automatski, no može se time upravljati i ručno, u kojem slučaju se nakon danog vremena ručno podešuje slabiji režim rada kako bi se komponente motora mogle ohladiti. U iznimnim situacijama moguće je produljenje tog režima na dva intervala u trajanju od 15 do 30 minuta, te jednokratni rad u trajanju od 60 minuta nakon kojeg se motor mora zamijeniti. [2]

2.4.2 Nominalni režim

Režim koji se u redovnim situacijama koristi u propinjanju, lebdenju, te letu sa normalnim opterećenjem masa. On iznosi 90% maksimalne snage koju motor postiže, te se naziva maksimalna kontinuirana snaga. Njegovo ograničenje iznosi 1 sat.[2]

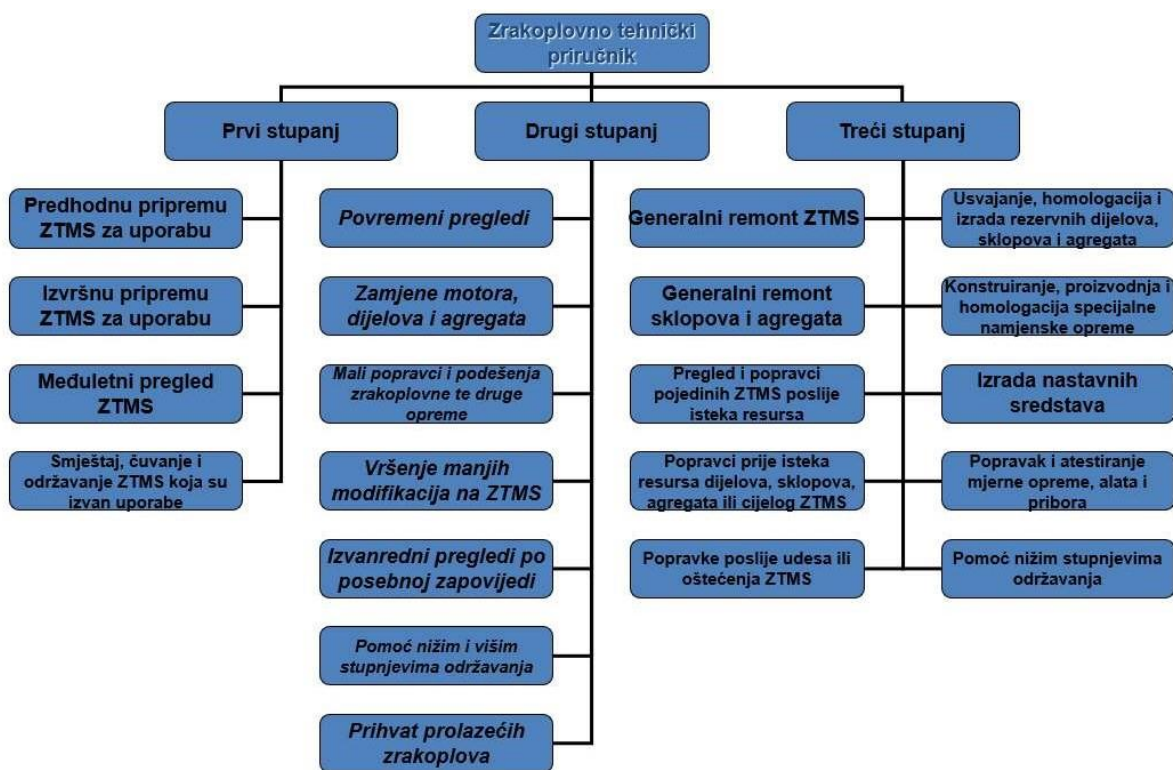
2.4.3 Krstareći režim

Krstareći režim je režim u kojem nema vremenskog ograničenja, te se koristi u horizontalnome letu. Ovaj režim ima dvije podkategorije, a one su:

- Normalni krstareći režim – režim koji se koristi pri horizontalnome letu za prijevoz putnika ili tereta
- Reducirani krstareći režim – režim koji se koristi pri patroliranju, dodatno se smanjuje snaga i time se smanjuje satna potrošnja goriva
-
- Poseban režim rada je minimalni samoodrživi režim rada koji se koristi
- za zagrijavanje i hlađenje motora [2]

3. METODE ODRŽAVANJA POGONSKOG SUSTAVA Mi Mi 171 SH

Helikopter *Mil Mi 171sh* u Hrvatskoj se održava u vojnoj organizaciji za održavanje zrakoplova te program održavanja i organizacija za održavanje ne podlažu civilnim EASA propisima. Održavanje je podjeljeno u tri stupnja. Stupnjevi održavanja ovise o kompleksnosti samog posla, gdje je prvi stupanj odgovoran za poslove najmanje kompleksnosti, a treći najvišem. Program održavanja u Republici Hrvatskoj je spoj održavanja propisanog od strane proizvođača zrakoplova i zrakoplovno – tehničkog priručnika. Organizacije ispunjavaju propise koji se definiraju u Pravilniku o kontinuiranoj plovidbenosti i održavanju vojnih zrakoplova. Održavanje se vrši prema tehničkoj dokumentaciji koju izdaje proizvođač zrakoplova, te se civilne norme ne primjenjuju, no možemo pronaći sličnosti. [3] Na slici 9 prikazana je struktura sustava održavanja zrakoplova u HRZ-u.[4]



Slika 9. – Prikaz vojne podjele procesa održavanja[4]

3.1 Specifičnosti održavanja pogonskog sustava *Mi171sh*

Motor *TV3-117* održava se a vojnom praksom koja podrazumjeva održavanje u fiksnim vremenskim intervalima. Vremenski intervali se mjere u satima rada motora, satima leta, te broju ciklusa koje dani motor izvrši. Motor *TV3-117* je izrađen u mnogo varijanti, te trenutačne varijante imaju životni vijek koji iznosi 12000 sati ili 12000 ciklusa, te je definirano vrijeme između obnove (TBO) od 5000 sati ili 5000 ciklusa. Također, postavljeno je kalendarsko ograničenje životnog vijeka motora u iznosu od 10 godina. [5]

3.1.1 Redovno održavanje motora *TV3-117*

Prateći priručnik za održavanje motora zrakoplova *TV3-117* navedeni su sljedeći procesi u definiranim intervalima sati leta:[1]

- Mjerenje trošenja rotora prvog stupnja kompresora na usisniku motora koji se dijeli u tri kategorije one su: ispod 1mm, od 1 do 1.5 mm, te od 1.5 do 2mm. Provjere se izvode u intervalima od svakih 25, 50 i 100 sati leta. Ukoliko je trošenje lopatica veće od 1.8mm provjera se mora izvršiti svakih 20 ciklusa leta motora.
- Provjera i ispiranje pročistača ulja, izvodi se svakih 100 sati leta.
- Provjera i ispiranje pročistača ulja u povratnom vodu koji se nalazi između 4. i 5. spoja za pričvršćivanje motora, izvodi se svakih 100 sati leta.
- Provjera, ispiranje i operativni test detektora čestica u usisniku motora, svakih 100 sati rada.
- Čišćenje brizgaljke za gorivo, u intervalu od 100 sati.
- Čišćenje i zamjena elementa pročistača goriva, u intervalu od 100 sati, te se taj proces mora napraviti poslje prvih 25 sati rada novog motora ili prilikom zamjene spremnika goriva na helikopteru.
- Provjera i ispiranje pročistača goriva na sustavu za ubrizgavanje goriva u intervalu od 100 sati.
- Provjera i ispiranje pročistača hidrauličkih aktuatora u intervalu od 100 sati.
- Provjera i ispiranje zračnog pročistača sustava za upravljanje gorivom u intervalu od 100 sati.
- Provjera i čišćenje regulatora na starteru i regulatora za ubrzavanje motora na minimalnu samoodrživu brzinu u intervalu od 50 sati.
- Provjera pročistača zraka na zračnom starteru u intervalu od 100 sati.
- Ispuštanje zraka iz gorivnog sustava u intervalu od 100 sati.
- Zamjena ulja u motoru i zračnom starteru u intervalu od 300 radnih sati, te ukoliko je ispunjeno manje radnih sati u periodu od jedne

- kalendarske godine također provesti zamjenu ulja.
- Provjera spoja motora i glavnog reduktora u intervalu od 100 sati.
 - Provjera spoja ispušne grane sa ostatkom motora u intervalu od 100 sati, te dodatna provjera u slučaju skidanja motora, nakon prvog leta helikoptera, te nakon prvih 5 letova helikoptera.
 - Provjera regulatora temperature u intervalu od 300 sati.
 - Provjera i operativno testiranje elektroničkog regulatora motora u intervalu od 100 sati.
 - Provjera otpora senzora temperature na terminalu PT-12-6 u intervalu od 100 sati.
 - Provjera izbijanja kratkog spoja između senzora temperature i kućišta motora u intervalu od 100 sati.
 - Provjera stanja statora na kompresoru u intervalu od 300 sati.
 - Probni rad motora nakon održavanja u intervalu od 100 sati.
 - Provjera brtvi: brtva pročištača za ulje u intervalu od 100 sati, brtva pročištača za gorivo u intervalu od 100 sati, brtva pročištača goriva sustava za ubrizgavanje goriva u intervalu od 100 sati, te provjera brtve na čepovima za doljevanje i ispuštanje ulja zračnog startera u intervalu od 300 sati.
 - Čišćenje usisnika motora u intervalu od 100 sati.[1]

3.1.2 Izanredno održavanje motora TV3-117

Motor *TV3-117* se održava izvanredno u slučaju pojave neočekivanih kvarova. Popis rješenja tih kvarova nalazi se u priručniku za održavanje pogonskog sustava helikoptera. Važno je naglasiti kako je neki od tih kvarova moguće vrlo jednostavno riješiti u prvom stupnju održavanja, dok je za ostale potrebno radioničko održavanje.

Proizvođač *Klimov* definira sljedeće uvijete za provođenje vanrednog održavanja:[1]

- Eksploatacija pogonskog sustava mora se provoditi u skladu sa priručnikom za održavanje pogonskog sustava, priručnikom za održavanje helikoptera, te letnog priručnika helikoptera,
- Pogonska grupa koja se nalaze na helikopteru mora biti u popravljivom stanju.
- Elektrosustavi helikoptera koji provode električnu energiju moraju biti adekvatno spojeni.
- Instrumenti koji pokazuju parametre rada pogonskog sustava moraju biti u ispravnom stanju.

Za vrijeme provođenja vanrednog održavanja najbitnije je kroz priručnik

pronalaziti svaki mogući oblik otkaza, od najvjerojatnijeg do onog najmanje vjerojatnog.[1]

- Neuspjelo zapaljenje ili odgođeno vrijeme paljenja smjese goriva i zraka u komori izgaranja.
- Kompresor motora prestaje sa ubrzavanjem nakon početka izgaranja goriva.
- Visoka temperatura ispušnog plina pri pokretanju motora.
- Kompresor motora ne reagira na promjenu postavke snage u promjeni režima.
- Pojačana vibracija motora.
- Rano uključivanje sustava za ograničavanje temperature ispušnog plina.
- Pojava goriva u sustavu za podmazivanje.
- Povišena brzina rotacije kompresora pri minimalnm režimu rada
- Niska temperatura ispušnog plina pri kontinuiranom režimu rada
- Fluktuacija temperature ispušnog plina u stabilnim uvjetima leta
- Smanjenje brzine rotacije kompresora zbog pre velike brzine rotacije nosivog rotora u režimu poljetanja
- Paljenje alarma koji detektira prisutnost opiljaka u sustavu za podmazivanje
- Curenje goriva u sustavu za ubrizgavanje
- Prisutnost ulja u prvom stupnju kompresora
- Curenje ulja kod 4. i 5. spoja motora sa zmajem helikoptera
- Povišena brzina rotacije kompresora u režimu poljetanja
- Premašenje maksimalne brzine rotacije kompresora za vrijeme uključivanja protulednog sustava
- Pri paljenju se uključuje sustav za ograničavanje temperature ispušnog plina, te smanjuje režim ispod minimalnog samoodrživog
- Odvajanje cijevi sustava motora od ostatka motora, te curenja prouzrokovana njima
- Ne mogućnost motora da reagira na promjene postavki režima snage za vrijeme leta i poljetanja
- Naglo gašenje motora za vrijeme provjere na zemlji

Koraci za provjeru i rješavanje danih problema su definirani u priručniku za održavanje. [1]

4. PRIKAZ ODRŽAVANJA PRAĆENJEM RADNIH PARAMETARA

U zrakoplovstvu zapadnih zemalja primjenjuje se održavanje zrakoplova praćenjem radnih parametara. Ova metoda primjenjuje konstantno praćenje određenih radnih parametara motora, s ciljem predviđanja otkaza komponenti. Pomoću toga se može razviti program preventivnog održavanja zrakoplova ili sustava na zrakoplovu. Najjednostavnija definicija održavanja zrakoplova praćenjem radnih parametara je sljedeća: Praćenje radnih parametara motora je proces pri kojem promjena određenih parametara performansi pogonske grupe je korištena za identifikaciju i korekciju pojedinih komponenti motora. [6]

Program praćenja radnih parametara je u modernim programima uobičajen, te se kombinira sa raznim drugim programima i analitičkim metodama kako bi se osigurala plovidbenost i sigurnost zrakoplova. Sustav održavanja praćenjem radnih parametara omogućuje:

- Smanjenje troškova održavanja
- Povećanje pouzdanosti zrakoplova i njegovih sustava
- Rano otkrivanje grešaka u radu motora
- Smanjeno trajanje popravka motora
- Smanjeno trajanje greškolova kroz indikaciju na koji se dio motora treba posvetiti pažnja[21]

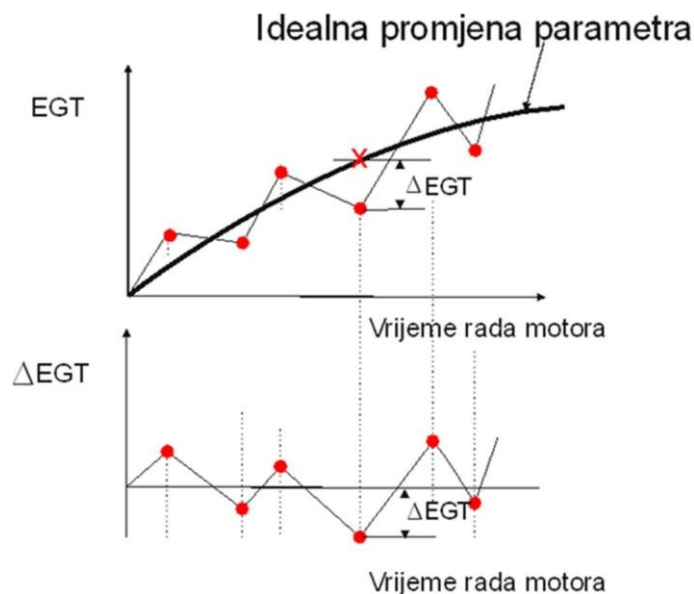
4.1 Osnovni postupci održavanja praćenjem parametara

4.1.1 Prikupljanje podataka za vrijeme leta

Prikupljanje podataka za vrijeme leta je najvažniji korak u postupku primjene *ECTM*-a. Podatci o performansama daju detaljan uvid u stanje kao i cijelog zrakoplova tako i u stanje pogonskog sustava. Podaci koji se prikupljaju su detaljno opisani u sljedećem poglavlju 'Analiza parametara radnog procesa motora'. Podaci se prikupljaju na dva načina, automatski i ručni. Automatski proces podrazumjeva korištenje sustava za zapisivanje podataka o performansi motora u realnom vremenu. Podaci se snimaju u realnom vremenu pomoću senzora i pohranjuju u memoriju sustava, te se kasnije koriste za analizu. Sustav za automatsko prikupljanje podataka se naziva *FDAU (Flight Data Acquisition System)* ili *ADAS (Aircraft Data Acquisition System)* Ručni način zahtjeva ručno zapisivanje podataka očitanih s instrumenata u određenim intervalima za vrijeme leta. Preporuča se zapisivanje podataka u minimalnim intervalima od 6 do 8 sati za vrijeme jednog radnog dana. Također prilikom zapisivanja parametara bitno je da se zrakoplov prije toga kretao u ustaljenom horizontalnome letu najmanje 5 minuta. [6]

4.1.2 Model obrade podataka

Kako bi podatke uspoređivali sa podacima koji su dobiveni prilikom testiranja motora u standardnim uvjetima, mora se vršiti proces prilagođavanja izmjerenih vrijednosti parametara koji su dobiveni pri standardnim uvjetima. Podaci su prikupljeni u realnom vremenu i uvjetima temperature i tlaka koji nisu nužno standardne vrijednosti. Nakon prikupljanja podataka vrše se tzv. normalizacija snimljenih parametara, tj. svođenje na standardne uvjete. Na slici 10 je na primjeru snimljenog parametra *EGT* prikazan način obrade podataka. Vrijednost *EGT* za ispravan motor ovisi o utrošenim resursu, odnosno o vremenu rada motora i to je prikazano kao idealna promjena tog parametra. Nakon izmjerenih vrijednosti *EGT*-a i obavljene normalizacije obavlja se usporedba izmjerenog podataka i idealne vrijednosti te se dobivaju tzv. Delta točke. Ako Delta točke tijekom korištenja motora formiraju približno horizontalnu liniju tada se radi o ispravnom trendu rada motora. Ako Delta točke pokazuje promjenu trenda ili nagli skok vrijednosti to onda ukazuje na pojavu neispravnosti motora koja zahtijeva daljnju analizu.



Slika 10. - Određivanje *Delta* parametra[4]

Vrijednost referentne linije (*Base Line*) koja predstavlja idealnu promjenu parametara se računa obično na temelju 15 ispravnih mjerenja., te se 10 najprihvatljivijih uzima kao referentna vrijednost. [18]

Normalizacija izmjerenih vrijednosti obavlja se na sljedeći način:

- Korekcijski faktor tlaka

$$-\delta = \frac{\text{očitani apsolutni tlak (inHg)}}{22,92(\text{inHg})}$$

- Korekcijski faktor temperature

$$-\theta = \frac{\text{Temperatura očitana na usisniku (K)}}{288,15}$$

- Korekcijski faktor protoka goriva

$$-K = \delta * \sqrt{\theta}$$

- Korigirana brzina vrtnje turbine kompresora

$$\text{Korigirani N} = \frac{\text{Očitana brzina vrtnje kompresora}}{\sqrt{\theta}}$$

- Koregirana temperatura ispušnih plinova

$$\text{Korigirana temperatura ispušnih plinova} = \frac{\text{Očitana temperatura ispušnog plina (K)}}{\theta}$$

- Korigirani protok goriva

$$\text{Korigirani protok goriva} = \frac{\text{Očitani protok goriva}}{K}$$

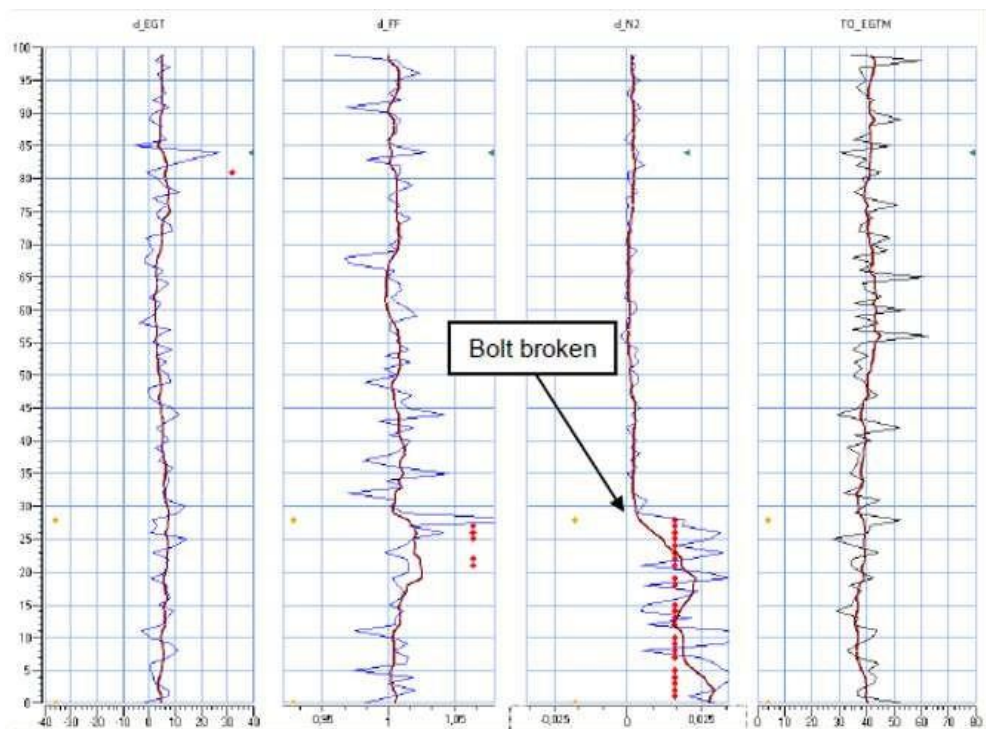
4.1.3 Obrada podataka

U prvim danima primjene *ECTM*- a zapisane podatke s instrumenata se unosilo u računalo i nakadno obrađivalo. Nakon toga se primjenjivala metoda pohrane podataka u računalo zrakoplova, a zatim su se podatci prebacivali nakon završetka leta na računalo i naknadno obrađivalo. U suvremenim zrakoplovima podaci se snimaju potpuno automatski tokom svih faza leta prema programu , koji je odabrao korisnik. Za automatski prijenos snimljenih podataka tokom leta

koristi se "Sustav zrakoplova za komunikaciju, adresiranje i izvještavanje – (ACARS). ACARS poruke se šalju putem VHF primopredajnika i zemaljske mreže do krajnjeg korisnika – operativnog centra operatora , zemaljska stanica može prema potrebi zatražiti podatke o radu nekog sustava tokom leta zrakoplova. Ovo omogućava kontinuirani nadzor, posebno pogonskih grupa zrakoplova.

4.1.4 Grafički prikaz rezultata mjerenja

Koristeći grafički prikaz rezultata mjerenja dobivamo najpogodniji oblik prikaza rezultata mjerenja. Prikaz se iskazuje kroz dijagrama Delta vrijednosti parametara koji se prate. Važno je naglasiti da se dijagnoza o stanju donosi nakon analize i upoređivanja svih parametara. Na slici 11 je prikazan tipičan oblik zapisa ECTM, te se vidi skokovita promjena Delta vrijednosti za parametar N2 koji ukazuje na kvar: „Bolt Broken“.



Slika 11. - Tipičan prikaz Delta vrijednosti[4]

4.1.5 Definiranje referentne linije parametara

Motori koji su prošli proces obnove ('overhaul'), te novi motori ispituju se prije puštanja u službu. Razlog tome je određivanje postizanja parametara rada na određenim režimima leta. Svaki motor mora postići definiranje ciljeve broja okretaja kompresora, broja okretaja slobodne turbine,

protoka goriva, itd. Za vrijeme eksploatacije zrakoplovnog motora, ti se parametri kontinuirano degradiraju. Razlozi tomu su mnogi, npr: erozija lopatica statora i rotora zbog sitnih čestica nastalih pri izgaranju, taloženje čestica izgaranja na statoru i rotoru turbine čime se mijenja njihov aeroprofil, onečišćenja brizgaljki, erozija statora i rotora kompresora zbog čestica u zraku, itd. Najbolja metoda definiranja stanja motora je provođenje analize trenda, u minimalnom intervalu od 5 dana. Ta analiza se mora provesti u stabilnim krstarećim uvjetima. Kasnije prilikom analize, praćenjem više parametara motora možemo otkriti tehnički kvar. Kvar će se manifestirati odstupanje delta krivulje od bazne krivulje u definiranoj margini. Međuovisnost tih parametara može definirati točan uzrok kvara. Ukoliko dolazi do nagle promjene jednog od parametara, te on nema utjecaj na druge parametre, dolazi do problema sa mjernim instrumentom koji je u kvaru. Također važna je za naglasiti kalibracija mjernih instrumenata koji se koriste za svaki individualni motor, jer motori istog modela uvijek imaju male razlike u krajnjem performansu, te se kalibracijom svode na slične rezultate. [18]

4.2 Metode praćenja radnih parametara

Postoji pet primarnih metoda kojima se prati parametri stanja motora a one su: [3]

- Analiza parametara radnog procesa motora.
- Vibracijska analiza.
- Vizualni pregled.
- Analiza ulja i njegove potrošnje.
- Metode nedestruktivnog ispitivanja elemenata motora.

Za efikasnu primjenu ovih metoda ključno je prilagoditi konstrukciju motora i ugraditi senzore primjena jer je važno praćenje stanja u realnom vremenu i tijekom čitavog životnog vijeka sredstva. Neke od metoda možemo primijeniti za vrijeme rada motora, a za neke presudno da motor ne radi.

4.2.1 Praćenje parametara rada motora

Ova metoda se koristi za utvrđivanje stanja glavnih dijelova motora jer njihovo stanje ima najveći utjecaj na radne parametre motora kao što su tlakovi, temperature, potrošnja goriva i brojevi okretaja, a ti se parametri vrlo jednostavno mjere. Tijekom eksploataciju glavni dijelovi se troše, a to se onda posljedično odražava na vrijednosti navedenih parametara. U daljnjem su primjeru pokazani parametri koji se prate na motoru *Pratt & Whitney PT6*: [6]

- Indicirana brzina leta: *IAS*

- Vanjska temperatura zraka: *OAT*
- Visina po tlaku zraka: *Palt*
- Brzina okretanja elise ili *N1*: *Np* ili *N1*
- Okretni moment na elisi: *TQ*
- Brzina vrtnje turbine kompresora: *NL*
- Temperatura ispušnog plina između turbina: *ITT*
- Protok goriva: *FF*

Parametri *IAS*, *OAT* i *Palt* služe za svođenje ostalih izmjerenih parametara za svođenje na standardne uvjete. Na slici 12. je prikazana tablica za ručno zapisivanje navedenih vrijednosti parametara s očitanih instrumenta u kokpitu zrakoplova.

The following engine parameters are to be noted on the first suitable flight of the day:

1. Engine parameters are to be taken in stabilized cruise conditions. **stabilization period of 5 minutes**
2. Engine inlet and airframe de-icing: OFF
3. Electrical loading: NORMAL
4. Air Conditioning. Control selector: NORMAL
5. Bleed switch: AUTO
6. Record the following parameters (as exactly as possible, do not round off the values):

Date: _____

Aircraft: _____

Flight No: _____

OAT: _____

P.alt (29.92"Hg): _____

| ENGINES | NO. 1 | NO. 2 |
|------------------|-------|-------|
| TQ (%) | | |
| Np (%) or N1 (%) | | |
| Ng/Nh/N2 (%) | | |
| NL(%) | | |
| ITT/T5/T6 (°C) | | |
| Wf (Kg/H or PPH) | | |

Slika 12. Prikaz kartice za ručno zapisivanje podataka trenda motora [21]

Važno je naglasiti da se nakon snimanja podataka oni moraju standardizirati, tj. pomoću računalnog sustava svesti na standardne uvijete. Parametri koji se standardiziraju uključuju: brzinu vrtnje turbine kompresora, temperaturu ispušnog plina između turbina i protok goriva.

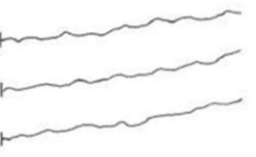
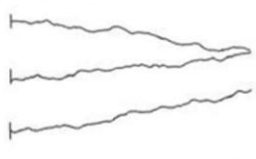
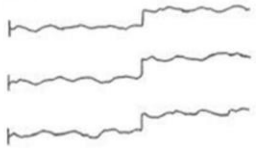
Nakon standardiziranja podataka, koristeći dijagnostički softver postavlja se dijagnoza. Prednost tog softvera je pristup bazi podataka koja sadrži velik broj primjera kvarova, te se tehničko osoblje ne mora oslanjati samo na vlastito iskustvo.[4] Neki od popularnih programa za praćenje stanja performansi motora su sljedeći:

- *COMPASS* – razvijen od strane tvrtke *Rolls Royce* u suradnji sa zračnim prijevoznikom *Lufthansom*. Razvijen i prilagođen za praćenje sustava motora *IAE V2500*. Kasnije inačice ovog programa primjenjive su i na još mnoge motore.
- *ADEPT*- razvijen od strane tvrtke *General Electric* za korištenje u svojim civilnim motorima *CF6* i *CFM 56*.
- *ECTM*- program razvijen od strane tvrtke *Pratt & Whitney*, te se koristi na njihovim turbo elisnim motorima. [3]

Efikasni program *ECTM*-a sadrži sljedećih pet komponenti:[6]

- Prikupljanje podataka za vrijeme leta.
- Preuzimanje, korekcija te usporedba podataka sa matematičkim modelima za ispravni motor.
- Analiza podataka te traženje anomalija u performansu.
- Korekcijski postupci u održavanju.
- Računalni hardver i softver [6]

Na slici 13. prikazana je tablica za pomoć dijagnostičaru pri postavljanju dijagnoze o stanju motora kao primjer za elisnomlazne motore tvrtke *Pratt & Whitney*.

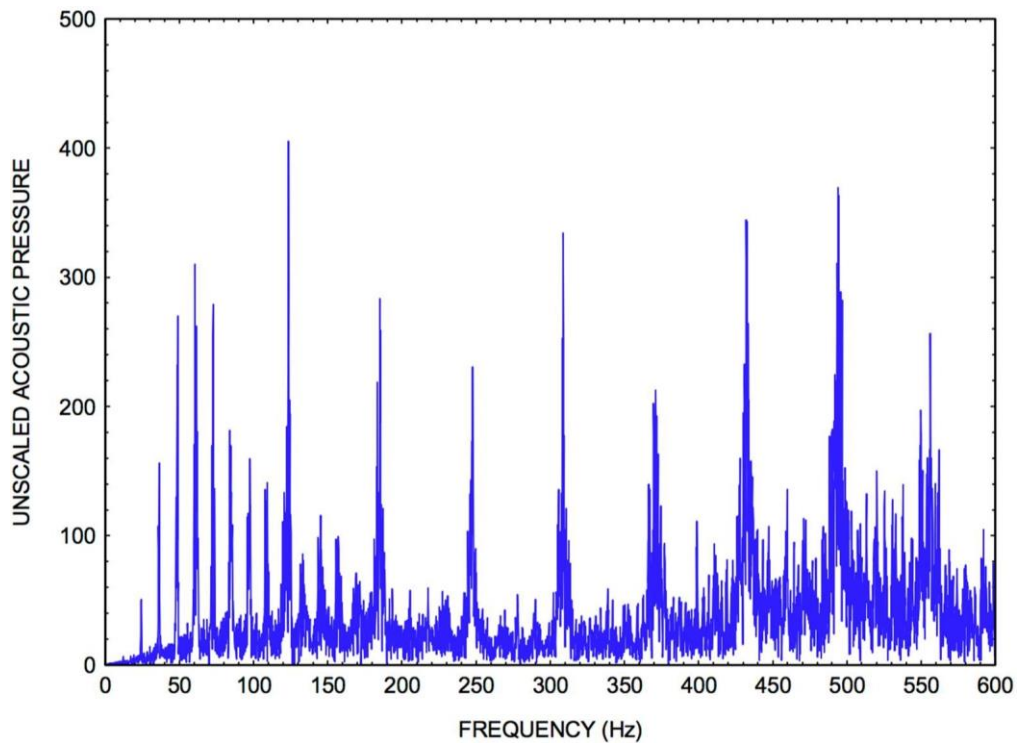
| Graph | Symptoms | Most Probable Cause |
|--|---|--|
|  <p>Ng/Nh/N2 ITT Wf</p> | <p>↑ Ng/Nh/N2 up gradually ↑ ITT/T5/T6 up gradually ↑ Wf up gradually</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Dirty compressor • Compressor erosion • Bleed valve closing point drifting • Tq or Np indication if drifting is only on one engine • OAT, Palt or IAS indication if drifting is similar on all engines |
|  <p>Ng/Nh/N2 ITT Wf</p> | <p>↓ Ng/Nh/N2 down ↑ ITT/T5/T6 up ↑ Wf step up</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Normal hot section deterioration taking place over years • CT vane ring distress • CT blade tip clearance increase • CT blade distress/deterioration |
|  <p>Ng/Nh/N2 ITT Wf</p> | <p>↑ Ng/Nh/N2 step up ↑ ITT/T5/T6 step up ↑ Wf step up</p> | <ul style="list-style-type: none"> • FOD in compressor • Compressor bleed valve stuck open • Tq or Np indication problem (if only one engine for twin engine aircraft) • OAT, Palt or IAS indication drifting if on all engines |

Slika 13. Prikaz simptoma te posljedičnih mogućih kvarova u motoru [21]

4.3 Metode praćenja radnih parametara

4.3.1 Vibracijska analiza

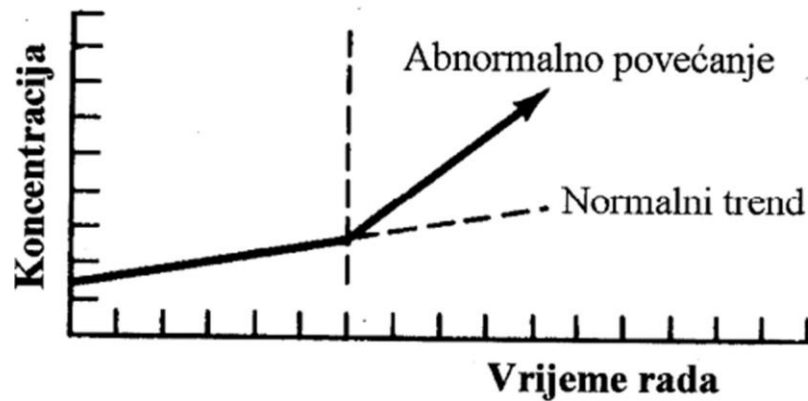
Vibracijska analiza predstavlja primarni oblik detekcije neuravnoteženosti rotora motora. Ova metoda za razliku od pilotskog indikatora koji prikazuje granično područje vibracija, cijelo vrijeme prati promjenu u razini vibracija, te donosi informacija za brzo detektiranje neuravnoteženosti komponenti rotora. Pojačane vibracije najčešće su posljedica kvarova na lopaticama kompresora i turbine, ali mogu se javiti i od oštećenja ležajeva. [3][4]



Slika 14. – Rezultati vibracijske analize [22]

4.3.2 Analiza ulja

Cirkuliranjem ulja kroz motor za vrijeme podmazivanja, u ulju ostaju mali opiljci raznih dijelova koji se troše. S obzirom da se trošenje određenih dijelova odvija u predviđenom razmjeru, analizom ulja te detekcijom raznih čestica u njemu možemo otkriti s kojeg se dijela opiljak odvojio. Ukoliko se pojavi povećana razina opiljaka nekog dijela, poznavanjem dijelova motora i materijala od kojih su napravljeni, možemo detektirati od kuda je ta čestica došla, te odrediti novi interval trošenja, te samim time i vrijeme zamjene. Elementi čija se koncentracija prati uključuje: željezo, krom, bakar, magnezij, aluminijs, srebro, nikal, titan, silicij, itd. Važno je za naglasiti da silicij nije dio same konstrukcije motora, nego u njega dospjeva reakcijama sa okolnom atmosferom, te može izazvati oštećenja ležajeva. [3][4]



Slika 15 .– Prikaz povećanja čestica metala u ulju [3]

4.4 Metode otkrivanja kvarova nakon provedene analize parametara

Metodika otkrivanja kvarova nakon pojave odstupanja se bazira na NDT metodama. NDT metode se baziraju na pronalasku mikropukotina u materijalu. Njihova karakteristika je ta što se poslje njihove uporabe, dio može ponovo upotrijebiti, tj. ne dolazi do oštećenja za vrijeme ispitivanja. Također su određene NDT metode vrlo korisne pri otkrivanju oštećenja koje su nedostupne ljudskom oku. Metode koje se primjenjuju u održavanju zrakoplova su: [3]

- Vizualna metoda.
- Magnetska metoda.
- Peneterantska metoda.
- Radiografija.
- Metoda vrtložnih struja.[3]

4.4.1 Vizualna metoda

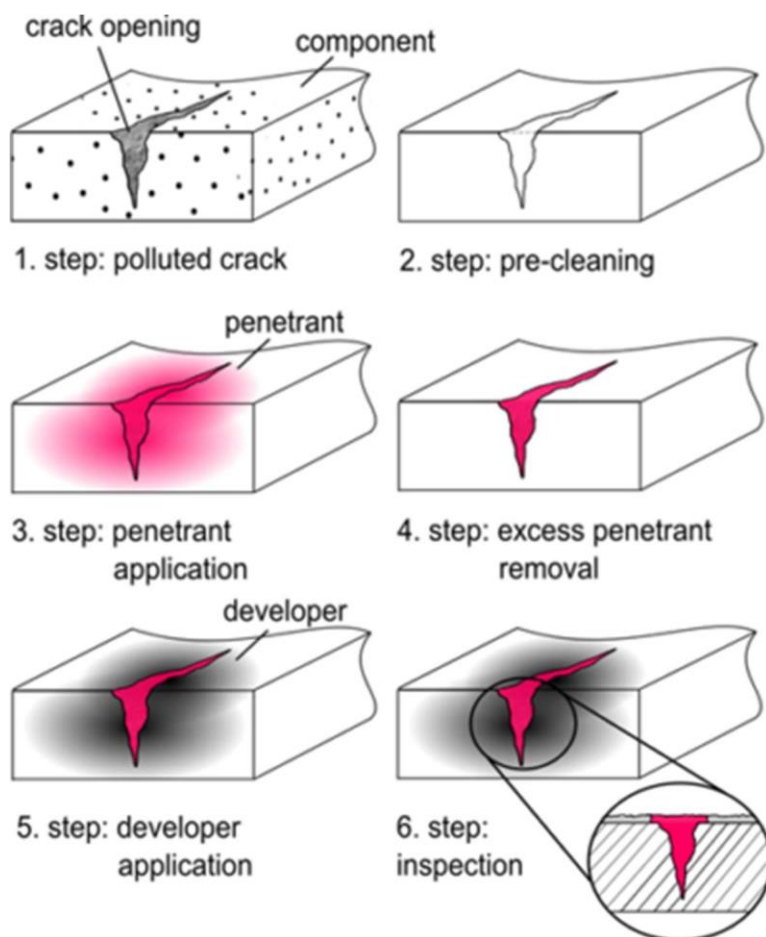
Vizualna metoda predstavlja najjednostavniji, najčešći te najprimjenjiviji oblik NDT analize. Ona se obavlja tako što se područje koje je namijenjeno za provjeru provjerava okom, te se bilježe bilo kakve anomalije na površini. Također se pri njegovoj primjeni mogu koristiti razna pomoćna sredstva kao što su: povećala, izvori svjetla, te posebni optički uređaji. Osnovna oprema za provođenje vizualne inspekcije kod područja koja su zatvorena je videoskop. Motori na sebi sadrže rupe za boroskopiju, te se njom najčešće provjeravaju statori i rotori kompresora i turbina, te komora izgaranja. [3][4]



Slika 16. - Videoskop[8]

4.4.2 Penetrantska metoda

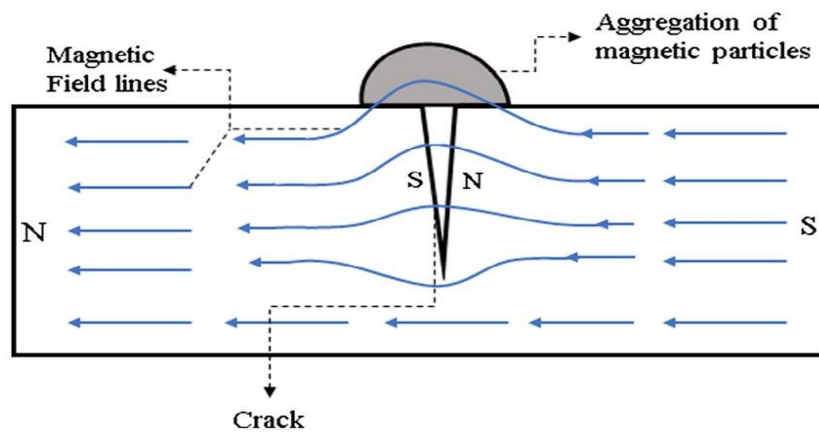
Penetrantska metoda se koristi za detektiranje sitnih pukotina ili praznina na površini nekog materijala. Njena primjena ovisi o sposobnosti tekućine koja se koristi da prođe u površinu materijala. Proces se generalno odvija sljedećim postupkom. Površinu koju namjeravamo ispitati prvo detaljno očistimo. Nakon toga nanosimo penetrant. Sljedeći korak je puštanje penetranta neko određeno vrijeme (zavisno o površini i penetrantu) da se upije u površinu. Nakon toga površina se briše krpom, vodom ili razrjeđivačem, zbog toga što se tako penetrant briše samo sa površine, a ostaje u pukotinama i šupljinama na površini. Zadnji korak ove metode je nanošenje razvijajuća, tvari koja iznosi penetrant na površinu, te tada vizualnim pregledom jasno možemo vidjeti gdje je pukotina ili šupljina, jer se boja razlikuje od boje površine predmeta koji pregledavamo. [3][4]



Slika 17. – Ilustracija penetrantske metode [9]

4.4.3 Magnetska metoda

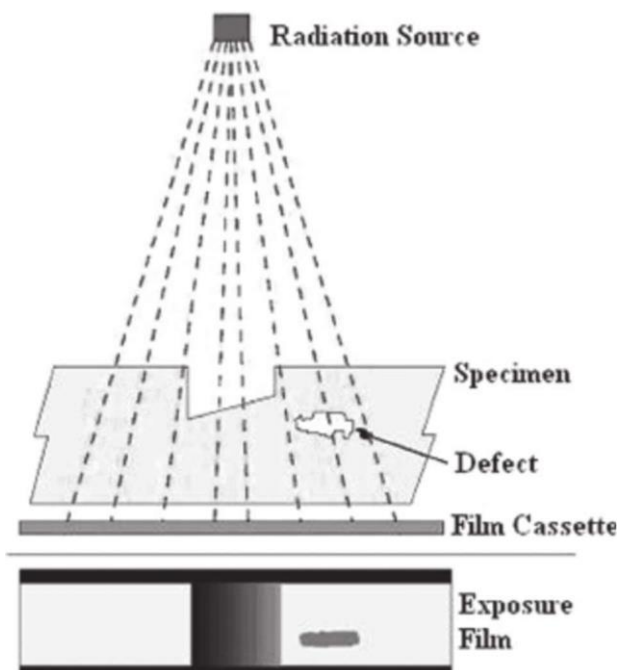
Magnetska metoda je metoda koja se koristi za detekciju pukotina i prazina (površinskih i potpovršinskih) u magnetskim materijalima. Metoda se provodi tako da induciramo magnetsko polje oko predmeta koji pregledavamo, te nakon toga na njegovu površinu nanosimo željezni oksid. Željezni oksid je dostupan u dva oblika, prvi je u prahu te njegovim korištenjem dobivamo takozvanu 'suhu' metodu, dok je druga u obliku tekuće suspenzije željeznog oksida, te takvu metodu nazivamo 'mokrom' metodom. Magnetsko polje induciramo na način da pustimo električnu energiju kroz dani predmet, predmet postavimo u zavojnicu kroz koju puštamo električnu energiju ili koristimo magnete koji su u doticaju sa predmetom kojeg ispitujeemo. Ukoliko je na mjestu na kojem smo nanjeli prah ili suspenziju došlo do deformacije, doći će na tom mjestu do pojave povećanog otpora magnetskih silnica. Čestice se okupljaju oko površine pukotine, te se mogu vidjeti pod fluorescentnim svjetlom ili UV lampom. Ova metoda se najčešće provodi sa takozvanim 'ferofluks' uređajima, koji generiraju istosmjernu ili izmjeničnu struju velike jakosti no niskog napona. [3][4]



Slika 18. – Prikaz magnetske metode[10]

4.4.4 Ispitivanje radiografijom

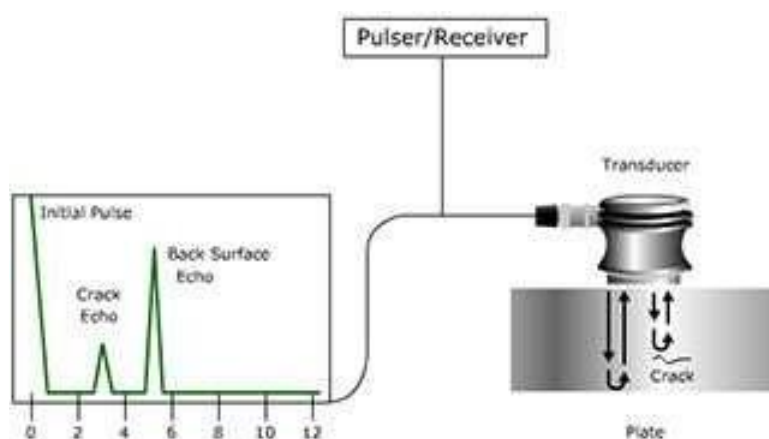
Ova metoda koristi X ili gama zrake kao izvor ionizirajućeg zračenja, te prolaskom zraka otkriva unutrašnjost predmeta. Ova metoda je vrlo korisna, zbog toga što osim pukotina i praznina na površini također ukazuje na iste u unutrašnjosti predmeta koji ispitujeemo. Ova metoda je iznimno korisna kod pregleda elemenata zrakoplovnih konstrukcija koji su slabo dostupni. [3][4]



Slika 19. – Prikaz radiografske metode [11]

4.4.5 Ispitivanje ultrazvukom

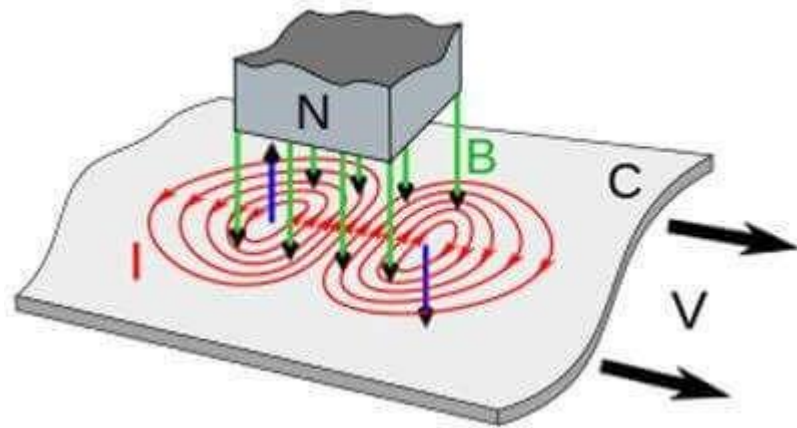
Ispitivanje ultrazvukom vrši se korištenjem visokih frekvencija zvuka (iznad 20 kHz), te njihovim prolaskom kroz predmet. Korištenjem kontaktne sonde na dijelu predmeta koji želimo testirati, kroz predmet puštamo ultrazvučne valove. Također u njemu se nalazi ultrazvučna sonda koja prima povratne valove nazad. Prolaskom zvučnog vala kroz predmet događa se refleksija. Dobiveni povratni signal u sondi se nakon toga pretvara u električni impuls. Ukoliko se u predmetu nalazi neka deformacija ili greška, ona će biti jasno vidljiva na osciloskopu koji ju prikazuje. Najčešći način generiranja ultrazvučnog signala je piezoelektrični efekt. [3][4]



Slika 20. – Prikaz ultrazvučne metode[12]

4.4.6 Metode vrtložnih struja

Ovo je metoda koja se primjenjuje kod materijala koji su električno provodljivi. Također ona se primjenjuje na dijelovima zrakoplova koji se mogu izložiti sondi. Ova metoda je podobna za otkrivanje lomova na površini ili u blizini površine metala. Pregled se izvršava tako, što se u sondi inducira vrtložno polje. Svojstvo vrtložnog polja je to, što se ponaša vrlo slično kao stlačivi medij kad naiđe na prepreku. Ukoliko se naiđe na prepreku, vrtložno polje putuje oko nje, slabi i komprimira se. Po razmjeru tih promjena možemo nakon tog interpretirati grešku. Važno je za naglasiti da se pri primjeni ove metode mora koristiti izmjenična struja sa odgovarajućim naponom i frekvencijom. [3][4]



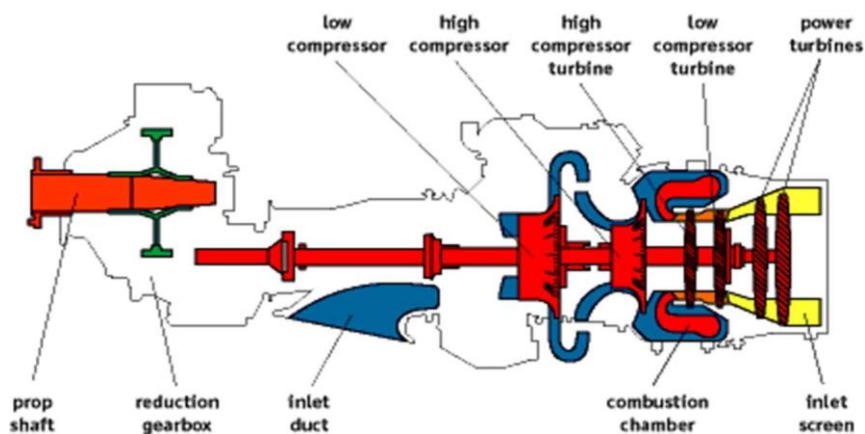
Slika 21. – Ilustracija metode vrtložnih struja [17]

5. PRIMJER ODRŽAVANJA PRAĆENJEM RADNIH PARAMETARA NA MOTORIMA *PRATT & WHITNEY CANADA* SERIJE *PW100* i *PT6*

Motori proizvođača *Pratt & Whitney Canada* već dugu niz godina nalaze primjenu u civilnom i vojnome zrakoplovstvu. Zbog potreba civilnog zapadnog zrakoplovstva ovaj je proizvođač razvio program praćenja radnih parametara. Ovaj program uz dane prednosti polako nalazi i primjenu u vojnome zrakoplovstvu zbog danih prednosti. U nastavku dani primjer primjene *ECTM*-a na elisnomlaznim i vratilnomlaznim motorima tvrtke *Pratt & Whitney Canada* koji mogu biti podloga za razradu *ECTM*-a za vratilnomlazni motor na helikopteru *Mil Mi 171sh*. [6]

5.1 Motor serije *PW100*

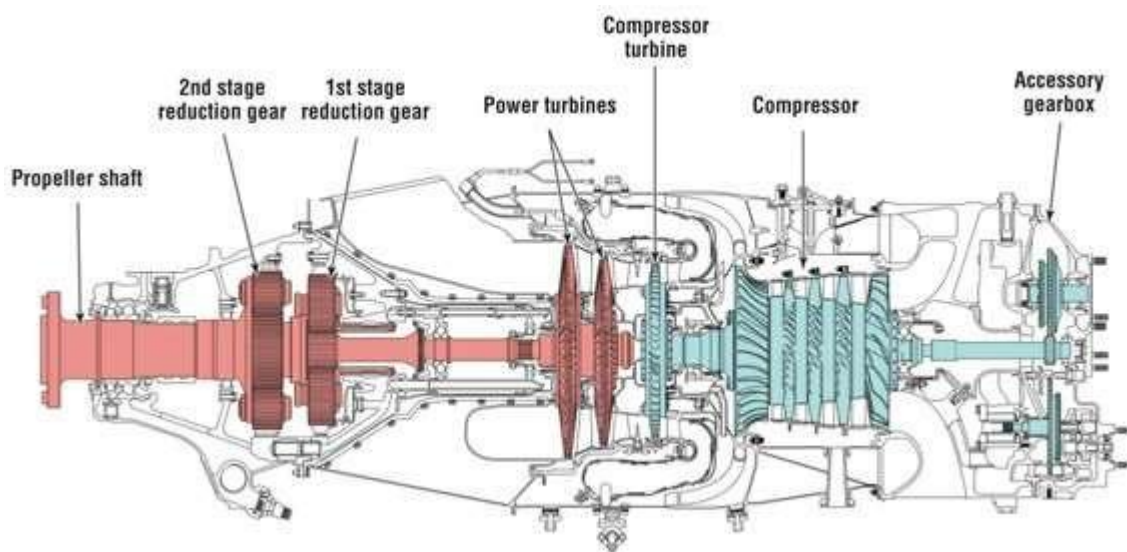
Motori *Pratt & Whitney Canada PW100* su serija elisnomlaznih i vratilnomlaznih motora, prikazanih na slici 18. Dolaze u rasponu snage od 1300 do 3700 kW. Serija ovih motora pronalazi primjenu u raznim zrakoplovima te helikopterima, te je u Hrvatskoj u inačici *PW123AF* korišten na zrakoplovima *Canadir CL 415*, koje koristi HRZ za protupožarne aktivnosti, te u inačici *PW150* korišten na zrakoplovima *Bombardier Dash 8 Q400* Croatia Airlinesa. Ovaj motor se konstrukcijski sastoji od dva radijalna kompresora, osim u inačici *PW150*, gdje se nalaze tri aksijalna te jedan radijalni stupanj. Turbina kompresora je dvostupanjska reaktivana, dok je slobodna turbina dvostupanjska reaktivna. Visokotlačna i niskotlačna turbina nalaze se na različitim koncentričnim vratilima, te je važno za naglasiti da se slobodna turbina okreće u suprotnome smjeru rotacije turbina kompresora. Ovim razdvajanjem brzina rotacija stupnjeva kompresora poboljšana je efikasnost samog kompresora, te se pokretanje vrši jednostavnije, s obzirom da se starterom pokreće samo visokotlačni kompresor. Komora izgaranja je prstenastog tipa, te je strujanje u njoj strujanje sa povratnom strujom zraka. Na motor se veže glavni reduktor koji pokreće propeler i popratne sustave motora. [18]



Slika 22. - Shema motora *PW100*[19]

5.2 Motor serije PT6

Motori serije *PT6* proizvođača *Pratt & Whitney Canada* su serija elisnomlaznih i vratilnomlaznih motora. Dolaze u rasponu snaga od 430 do 1450 kW. U Republici Hrvatskoj ovi se motori koriste na vojnim zrakoplovima *Pilatus PC 9*, te na zrakoplovu *Air Tractor AT 802*. Kompresor ovog motora je aksijalno radijalni, te se zavisno o izvedbi sastoji od tri ili četiri aksijalna stupnja, te jednim radijalnim stupnjem. Komora izgaranja je prstenastog tipa, te ima povratno strujanje. Turbina se sastoji od jednostupanjske turbine kompresora, te dvostupanjske slobodne turbine. Na motor se veže reduktor koji pokreće propeler, te pomoćne sustave motora. [18]



Slika 23. – shema motora *PT6*[20]

5.3 Dijagnostika stanja motora na temelju praćenja parametara radnog procesa

5.3.1 Stanje kompresora

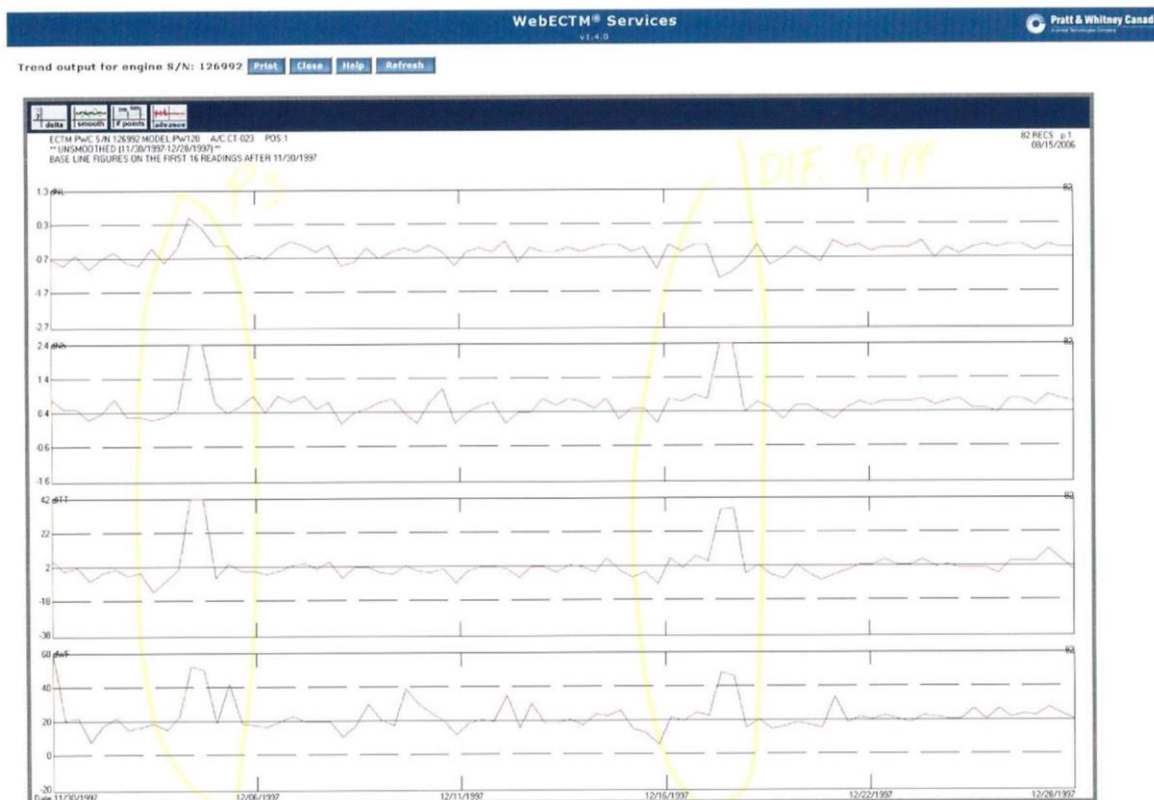
Stanje kompresora utječe na sve parametre koji se nalaze u putanji zraka prije komore izgaranja. Ovi problemi mogu izazvati degradaciju performansa motora. Do problema dolazi zbog poremećenja količine zraka, tlaka i temperature koji dolazi do komore izgaranja, te se time smanjuje snaga motora. [13]

Probleme s kompresorom definiraju sljedeći parametri:

- Porast brzine rotacije kompresora za isti režim rada.
- Povećana temperatura između turbina.
- Povećana potrošnja goriva u istom režimu.[13]

Primjeri kvarova koji se reflektiraju na parametre rada kompresora su sljedeći:

- Problemi sa usisnikom motora - Problemi s usisnikom zraka utječu na količinu zraka koja ulazi u motor, te time degradiraju performanse motora. Na količinu zraka koji prolazi kroz motor utječu sljedeća tri faktora: brzina rotacije kompresora, brzina zrakoplova, te gustoća zraka ovisno o uvjetima rada zrakoplova. Ukoliko dođe do problema s usisnikom zrakoplova, smanjuje se količina zraka koji dolazi do motora, te se kompresor rotira većom brzinom da bi proizveo isti maseni protok, što rezultira većom potrošnjom goriva i temperaturom između turbina.
- Sakupljanje čestica na statoru i rotoru motora - Ukoliko se čestice natalože na stator i rotor motora, dolazi do gubitka masenog protoka zraka kroz motor. Rezultat toga je smanjena snaga motora, te se mora povećati protok goriva za kompenzaciju. Povećani protok goriva rezultira povećanjem brzine rotacije kompresora, temperature između turbina i potrošnje goriva
- Erozijska lopatica kompresora – Uvjeti povišene koncentracije soli ili pijeska u zraku ubrzavaju proces erodiranja čestica. Lopatice statora i rotora se pjskare, te dolazi do ubrzane degradacije njihovog stanja. Ukoliko dođe do pojave ovog problema, simptomi koji se pojave na parametrima su isti kao i za sakupljanje čestica na statoru i rotoru kompresora.
- Oštećenje kompresora ulaskom stranog tijela – Simptomi ovog problema su isti kao i u prije navedenim slučajevim. Međutim razlika se nalazi u tome što do degradacije parametara u ovome slučaju dolazi naglo, a ne kroz vrijeme postepeno.
- Propuštanje zraka iz sekcije kompresora – Ovaj problem karakteriziraju povećanje gore navedenih parametara uz dodatno spužtanje brzine rotacije slobodne turbine. Razlozi za ovaj kvar su razni: kvar na sustavu protiv pumpanja motora, kvar sustava za tlačenje kabine, popuštanje brtvi na kritičnm dijelovima motora, itd. [13]



Slika 24. – primjer grafa parametara vibracija s problemima kompresora, gdje je na zacrtanom žutom području vidljivo povećanje vibracija[13]

5.3.2 Stanje komore izgaranja i turbina

Ove probleme *Pratt & Whitney* definira kao sve probleme u putanji zraka poslije komore izgaranja. Oni uključuju samu komoru izgaranja, te statore i rotore turbine. Problem ovog tipa smanjuje energiju koju turbina može proizvesti iz normalne struje zraka. U ovome slučaju, moguće je da motor razvija nominalnu snagu, zato što se manjak energije koju razvija turbina kompresora motora nadoknadi na slobodnoj turbini. Ovakve kvarove predstavljaju sljedeće karakteristike: [13]

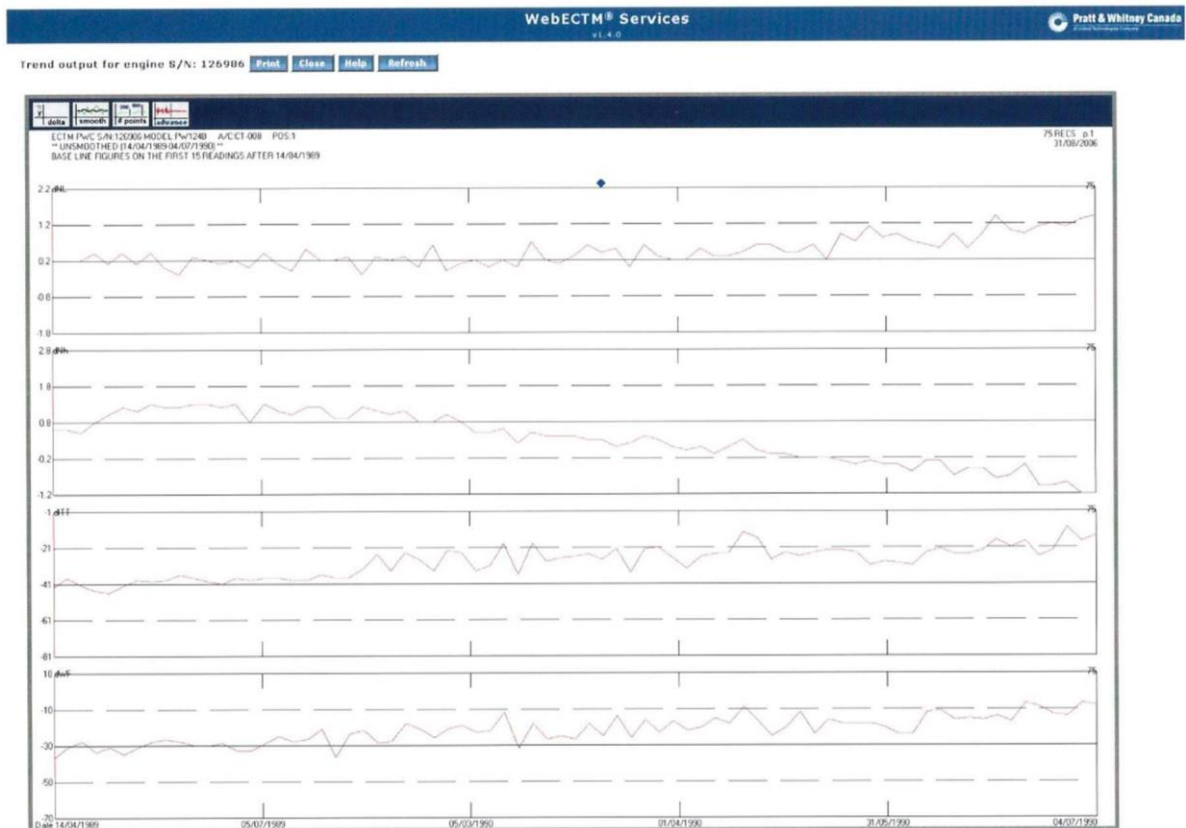
- Smanjena brzina vrtnje kompresora.
- Povećana temperatura između turbina.
- Povećana potrošnja goriva.[13]

Pratt & Whitney definira sljedeće kvarove koji se pojavljuju u ovom području:

- Izgaranje statora turbine kompresora – Ovaj kvar generalno je izazvan onečišćenom brizgaljkom goriva. U tom slučaju, kompresor se ne vrti adekvatnom brzinom, te se gubi snaga. Kako bi kompenzirali manjak snage, potrebno je povećati snagu na ručici, te se zbog oštećenja na turbini kompresor rotira manjom brzinom, te je povećana potrošnja

goriva i temperatura između turbina. Ova promjena događa se postepeno kroz vrijeme.

- Smanjenje zazora između turbine i kućišta motora – ovaj kvar izaziva grebanje lopatice turbine o kućište motora, zbog izduženja lopatice ili dugotrajna izloženost temperaturi većoj od dopuštene zbog čega dolazi do puzanja materijala. Ovisno o oštećenju, moguće je smanjenje rotacije i slobodne turbine, kao i turbine kompresora. Kod gubitka snage motora, na ručici se povećava snaga motora, koja samim time povećava protok goriva i temperaturu između turbina, a zavisno o oštećenju brzina turbine kompresora i slobodne turbine ostat će smanjena.
- Problemi sa brtvom između komore izgaranja i turbine – Ukoliko dolazi do oštećenja brtve, turbina kompresora stvara manju snagu, te se povećava režim rada koji kao posljedicu ima povećanje protoka goriva i temperature između turbina. [13]



Slika 25.- Prikaz grafa fluktuacije temperature između turbina (ITT) [13]

5.4 Primjer sustava korištenog za ECTM tvrtke ALTAIR

Američka tvrtka *Altair* razvila je više uređaja za praćenje parametara motora za vrijeme eksploatacije zrakoplova. Prvi takav uređaj naziva se *ALTAIR Trend Check*. Ovaj uređaj je razvijan zajedno sa tvrtkom *Pratt & Whitney Canada*, te je namjenjen motorima tipa *PT6*, te je u potpunosti kompatibilan sa programom *ECTM*. On prati sljedeće parametre motora: okretni moment motora, brzinu rotacije turbine kompresora i slobodne turbine, temperaturu ispušnih plinova, te maseni protok goriva. Također zabilježuje i sljedeće parametre leta zrakoplova: brzinu zrakoplova, visinu određen tlakom i ambijentalnu temperaturu. Ovaj sustav aktivira pilot pomoću prekidača na komandnoj ploči, te je sam sposoban odrediti kada su uvjeti adekvatni za preuzimanje podataka. Kao nadogradu ovog sustava *ALTAIR* je razvio poboljšanu verziju ovog sustava koja se naziva *ADAS*. Ovaj sustav za razliku od predhodno navedenog sustava prati 18 parametara a ne 9. Time je omogućeno praćenje potpunog stanja zrakoplova za vrijeme leta. Također može brojati broj ciklusa, pratiti poziciju zakrilaca te stajnog trapa, promjenu vertikalnog ubrzanja i opterećenje na svakom kotaču. Sve podatke sustav automatski povezuje sa datumom i vremenom.

Daljnijim razvojem tvrtka *ALTAIR* razvila je program *Intelstart PLUS*. Ovaj program je uz *Pratt & Whitney Canada* motore primjenjiv i na motore *Rolls Royce 250*. Dani motor je turbovratilni motor, maksimalne snage 313 kW, te se koristi na lakim helikopterima. Ovaj sustav je konfiguriran za ručno i automatsko prikupljanje podataka, te osim prikupljanja on pamti te podatke te ih se pomoću toga može na zemlji detaljno analizirati. Također ovaj sustav prati do 25 parametara, te je moguće ograničavanje definiranih parametara (npr ograničenje maksimalne temperature ispušnih plinova, čime se produljuje životni vijek vruće sekcije motora). Ukoliko se u potpunosti primjenjuje plan održavanja praćenjem radnih parametara, moguće je produljiti interval inspekcije vruće sekcije motora *PT6* sa 1200 na 2000 radnih sati, te vrijeme između obnove motora sa 3000 na 7000 radnih sati. [18]

6. PRIJEDLOZI POBOLJŠANOG PROGRAMA ODRŽAVANJA NA TEMELJU PODATAKA IZ ISTRAŽIVANJA

S obzirom na navedene primjere održavanja praćenjem radnih parametara, moguće je implementirati program održavanja praćenjem radnih parametara. Ponajprije za to je potreban novi ili obnovljeni pogonski sustav koji se može koristiti za prvotna umjeravanja. Zapisom promjene karakteriska motora kroz te letove moguće je odrediti referentnu liniju degradacije parametara pogonskog sustava. Po navedenim primjerima moguće je ručno zapisivanje sljedećih parametara:

- Indicirana brzina leta.
- Vanjska temperatura zraka.
- Visina po tlaku zraka.
- Brzina okretanja elise.
- Okretni moment na elisi.
- Brzina vrtnje turbine kompresora.
- Temperatura ispušnog plina između turbina.
- Protok goriva

Instrumenti koji pružaju uvid u te parametre su dostupni u kabini helikoptera, te je moguće kroz prvih 15 letova, kada znamo da je pogonski sustav u ispravnom stanju prikupiti podatke za analizu. Također na ovaj se helikopter naknadno može ugraditi sustav za automatski zapis parametara leta, čiji je primjer naveden u nastavku ovog poglavlja.

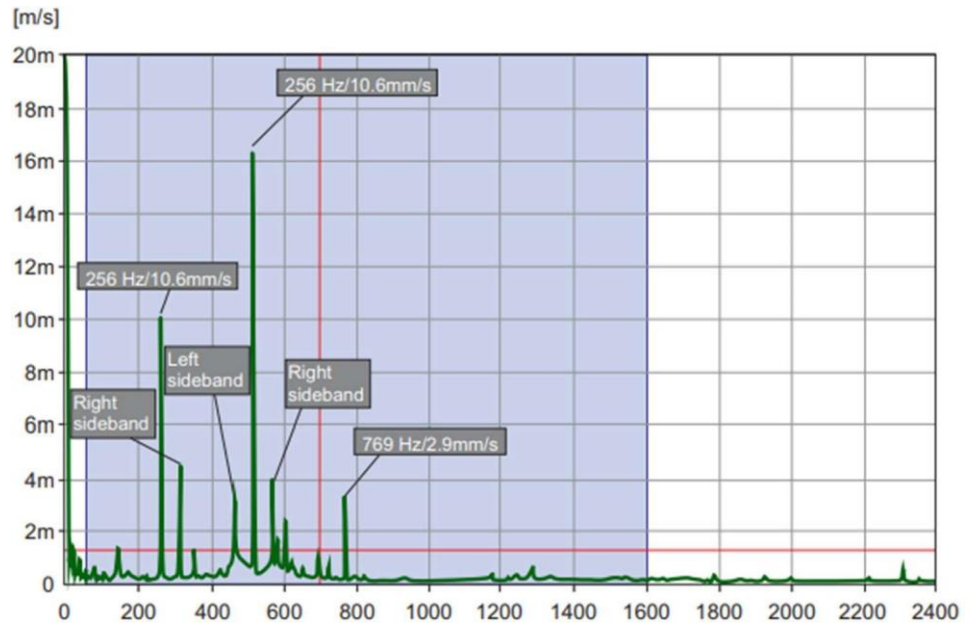
6.1 Primjenjivost održavanja praćenjem radnih parametara na helikopter *Mi171sh* i njegovu pogonsku grupu

Za vrijeme razvitka helikoptera *Mil Mi8* nije postojao program praćenja radnih parametara u svrhu održavanja. Ta karakteristika se nastavila kroz vrijeme unaprjeđenja i daljnjeg razvoja helikoptera, te je primjenjivo i na inačicu *Mi171sh*. Međutim, postoje sustavi koji su poslije razvijeni, te se mogu implementirati na dani helikopter, te se može vršiti ručni zapis podataka, koji se poslije može obraditi u softverima.



Slika 26. – prikaz letačkih instrumenata helikoptera *Mi171sh* [23]

Korištenjem instrumenata dostupnih za vrijeme leta, moguće je zapisati parametre koji bi se koristili kasnije na analizi. Valja također naglasiti da je *Mi171sh* korišten kao transportni helikopter, te većinu svog eksploatacijskog vijeka provodu u režimu krstarenja što ga čini podobnim za praćenje parametara rada pogonske grupe. Razmatrana varijanta helikoptera nije opremljena sustavom za mjerenje vibracija, te bi se za analizu vibracija ovog helikoptera koristiti sustavi bi se naknadno ugradili u helikopter. Ostali parametri kao što su brzina rotacije turbine kompresora i slobodne turbine, tlak i temperatura ulja, temperatura ispušnih plinova, te vanjska ambijentna temperatura dostupni su na instrumentima kontrolne ploče u kabini helikoptera. Ukoliko program leta dostiže adekvatne uvijete, te helikopter *Mi171sh* leti standardno s tročlanom posadom, moguće je da za vrijeme adekvatnih trenutaka leta mehaničar letač zapisuje parametre potrebne za praćenje radnih parametara. Postoji i mogućnost ugradnje sustava za automatsko praćenje radnih parametara, čiji je primjer naveden u nastavku ovog poglavlja.

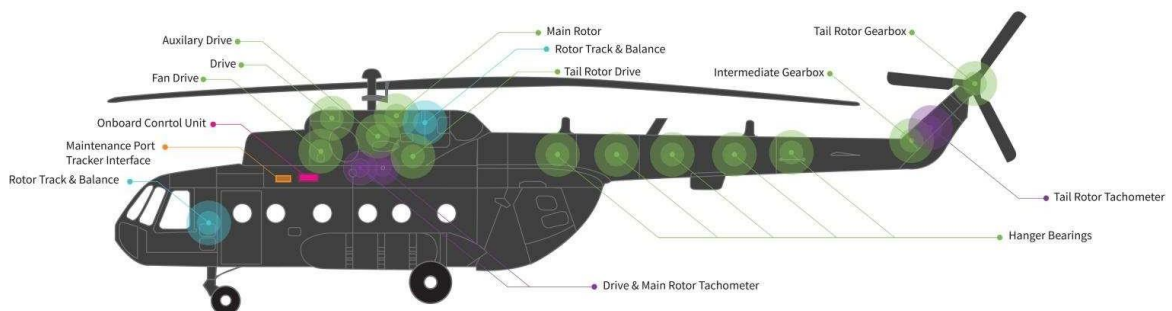


Slika 27. – rezultati vibracijske analize helikoptera *Mi171sh*[7]

6.2 Praćenje parametara stanja *Mi171sh* sa sustavom *GPMS Foresight MX*

Uporabom porodice helikoptera *Mi 8* u civilne svrhe, razvijene su metode održavanja praćenjem radnih parametara. Primjer toga je tvrtka *GPMS* koja je razvila sustav praćenja parametara na danom helikopteru. Sustav se sadrži od senzora koji prate:[14]

- Vibracije rotora i pogonskog sustava
- Parametre rada pogonskog sustava
- Parametre leta. [14]



Slika 28. – prikaz rasporeda senzora za ECTM na helikopteru *Mi8*[15]

Na gornjoj slici prikazan je raspored senzora koji se ugrađuju u helikopter *Mi 171sh*. Prednost ovog sustava je pogodnost na ugradnju u postojeći tip helikoptera. Koristeći već razvijeni set senzora koji je primjenjiv na više tipova zrakoplova,

moguće je primjeniti ovaj sustav kroz minimalna ulaganja. Također valja za naglasiti kako se za ovaj helikopter može primjeniti program *Foresight Mx*, razvijen od tvrtke *GPMS*, koji je također primjenjiv na više tipova zrakoplova, te je certificiran od strane *FAA* za uporabu na helikopterima *Mi 8* i *Mi 171sh*. [14]

6.3 Primjenjivost održavanja praćenjem radnih parametara na motoru *TV3 – 117*

Motor *TV3-117* je moguće održavati praćenjem radnih parametara. Tvrtka *Klimov* je u novijem priručniku za održavanje navela uvijete zapisa parametara rada motora. [2]

Motor se za zapis podataka mora nalaziti u okruženju, čija visina ne smije prelaziti 2500 metara, te vanjska temperatura ne smije biti viša od 25 °C. Nakon uzlijetanja, helikopter se postavlja u stanje niskog lebdenja. Pri tome se provjerava brzina rotacije kompresora oba motora. Ukoliko je razlika veća od 2% , let se prekida. Iznimno je dopuštena razlika od 3% ukoliko postoji ograničenje masenog protoka zraka kroz motor. U poletnom i minimalnom samoodrživom režimu brzina rotacije kompresora nije ograničena. Kod daljnjeg nastavka leta, broj okretaja nosivog rotora ne smije biti niži od 88% maksimalnog, niti preći 103%. Prelazak tih ograničenja moguć je jedino u iznimnim situacijama, u vremenskom roku od 20 sekundi.

Klimov dalje navodi da su najčešća odstupanja koja se primjete za vrijeme zapisivanja podataka: odstupanje temperature ispušnog plina, temperature ulja, te odstupanje tlaka ulja.

Ukoliko se pojavi povećanje temperature ispušnog plina najčešći problemi su:

- Povećano trošenje ležajeva rotora.
- Pumpanje kompresora.
- Led na usisniku motora.
- Oštećenje lopatica statora i rotora turbine.[2]

Suprotno tome, snižena temperatura ispušnog plina ukazuje na probleme sa sustavom za ubrizgavanje goriva. Posebno valja naglasiti ako do povišene temperature dođe već pri pokretanju motora, te pri najvišem režimu rada, u tom slučaju može doći do katastrofalnog kvara motora, te ugroziti sigurnost leta.

Povećanje temperature ulja motora najčešće je izazvano premalenom količinom ulja u sustavu za podmazivanje. Ukoliko se povećanje temperature dogodi naglo, dolazi do ulaska zraka u sustav za podmazivanje.

Pad tlaka ulja sustava za podmazivanje indikator je sljedećih kvarova: [2]

- Smanjena količina ulja u sustavu za podmazivanje.
- Začepljenje pročistača za ulje.
- Curenje ulja u vodovima ili motoru.
- Ulazak zraka u sustav za podmazivanje.
- Kvar pumpe za ulje.[2]

Ukoliko motor nastavi rad sa ovakvim kvarom, moguće je oštećenje ležajeva turbine i kompresora. [2]

6.4 Prijedlozi poboljšanog plana održavanja komponenti pogonske grupe helikoptera *Mil Mi 171sh*

6.4.1 Praćenje stanja usisnika i kompresora

Usisnik i kompresor motora održavaju se u vremenskim intervalima od 25, 50, te 100 sati leta. U definiranim vremenskim intervalima potrebno je provesti vizualnu provjeru stanja komponenti. Međutim, ukoliko implementiramo metode praćenja radnih parametara, ponajprije vibracijsku analizu i praćenje margine temperature ispušnog plina moguće je produljiti resurs motora, smanjiti vrijeme između popravke komponenti, te smanjiti trošak održavanja. Također vrlo važan parametar za praćenje rada kompresora je brzina rotacije kompresora, te je njeno odstupanje jedna od naznaka potencijalnog problema rada. Analiza ulja motora može dati uvid u komponente koje se troše brzinom većom nego što je definirano, npr ležajeve vratila. Nadalje primjenom videoskopske analize moguće je izbjeći dijelomično rastavljanje motora radi provjere tolerancije lopatica, zbog toga što se disbalans rotora kompresora najprije očituje u vibracijskoj analizi. Primjena ove metode je na motorima *Klimov RD-33*, korištenim na vojnom zrakoplovu *MiG 29*, produljila resurs kompresora motora za 30 sati leta u odnosu sa definiranim vremenima održavanja proizvođača zrakoplova.

6.4.2 Praćenje stanja komore izgaranja

Redovno održavanje komore izgaranja motora *TV3-117* podrazumjeva čišćenje brizgaljki u intervalu od 100 sati leta. Tvrtka *Klimov* definira ukoliko dolazi do problema sa brizgaljkama, pojavit će se pad temperature ispušnog plina. Praćenje tog resursa može eliminirati interval od 100 sati rada, te umjesto njega postaviti marginu temperature koja definira stanje brizgaljke. Sama komora

izgaranja podložna je obnovi svakih 5000 sati rada, te se taj interval također može produljiti korištenjem NDT metodi, ponajprije vizualnom inspekcijom korištenjem videoscopa, te metodom ispitivanja radiografijom i ultrazvukom, koji ne zahtijevaju uklanjanje motora i djelomično rastavljanje. Povećanje životnog vijeka postignuto na motorima *Klimov RD-33* iznosi 50%. [16]

6.4.3 Praćenje stanja turbina

Turbine su za vrijeme eksploatacije izložene značajnom toplinskom i mehaničkom naprezanju. Vizualna provjera turbina motora *TV3-117* se prema priručniku obavlja u intervalu od 100 sati. Korisna metoda kod praćenja parametra ove komponente motora je vibracijska analiza, praćenje broja okretaja turbina, te vizualna analiza. Ukoliko dolazi do mehaničkog oštećenja lopatica statora i rotora, prvo područje u kojem se vidi njihov disbalans je vibracijska analiza. Ukoliko dolazi do problema sa tolerancijom zazora, te turbine ne stvaraju dovoljnu količinu snage iz struje ispušnog plina, primjetiti će se poremećaj u broju okretaja slobodne turbine ili turbine kompresora. Ukoliko ti parametri odstupaju od normale, valja provesti također detaljnu vizualnu provjeru koristeći videoskop, te utvrditi stanje turbina. Za vrijeme primjene praćenja stanja motora *RD-33* primjećeno je da se spuštanjem temperature margine od 5% na prvom stupnju turbine može produljiti resurs motora za 20 radnih sati od definiranog od strane proizvođača. [16]

6.4.4 Praćenje stanja sustava za ubrizgavanje goriva i podmazivanje

Priručnik za održavanje definira intervale čišćenja filtera goriva i ulja od 50 i 100 sati, te interval zamjene ulja od 300 sati. Međutim, ovi se parametri mogu se zamijeniti analizom ulja i goriva. Analizom goriva i ulja utvrđujemo prisutstvo čestica u ulju i gorivu, te pomoću nje možemo utvrditi produljeni interval zamjene ulje i filtera. Također treba naglasiti da analiza daje i uvid u kemijski sastav samog ulja, te iz toga se može odrediti vrijeme degradacije samog ulja, te time potencijalno produljiti interval promjene zavisno o uporabi helikoptera. Prema [16] istraživanju pokazuje se da se do najveće degradacije ulja dolazi u režimima visoke snage motora, što se na npr. borbenim lovcima često dešava. Međutim kod transportnih helikoptera koji se ne nalaze toliko često u tim režimima, moguće je da se do degradacije ulja dolazi puno sporije, te da je taj interval u realnosti puno veći. Također analizom kakvoće goriva možemo utvrditi prisutnost raznih čestica u gorivu, te poznavanjem eksploatacije također se potencijalno može povećati interval čišćenja i zamjene filtera. [16]

6.4.5 Praćenje stanja komponenti pokretanih reduktorom

Kod komponenti pokretanih reduktorom, moguće je analizom ulja definirati stanje trošenja unutarnjih komponenti. Vrlo korisana u ovom slučaju je i vibracijska analiza pri kojoj se može stvrditi disbalans unitarnjih komponenti. U 'hard time' pristupu, reduktor se za vrijeme obnove motora kompletno rastavlja i pregledava, no pri uporabi ovih metodi moguće je eliminirati potrebu za time. Prema [16] istraživanju na reduktorima motora *Klimov RD-33* pokazuje da je obnova i provjera moguća za izbjeći te da se resurs može produžiti za 60% životnog vijeka. Također se umjesto potpunog rasklapanje reduktora preporuča djelomično rasklapanje sa videoskopijom koja ubrzava i pojednostavljuje proces vizualne provjere. [16]

7. ZAKLJUČAK

Održavanje zrakoplova jedan je od ključnih aspekata osiguranja plvidbenosti zrakoplova, te sigurnosti njegove posade i putnika. Troškovi koji su povezani s tim procesima spadaju među najveći udio u ukupnim troškovima zračnih prijevoznika i vojsci. Stoga je od ključne važnosti pokušaj smanjenja troškova održavanja. Dana metoda prikazuje prednosti praćenja stanja pogonskog sustava za vrijeme eksploatacije. Princip 'Hard Time' održavanja za sve komponente već je odavno napušten u svijetu civilnog zrakoplovstva. S toga ne čudi da se i vojske diljem svijeta odlučuju na održavanje prema stanju. Također zanimljivo je to što se ovom principu prilagođavaju zapadne vojske. Međutim kod starijih zrakoplova Ruske proizvodnje taj pristup se ne primjenjuje. Razlog tomu su tehničke karakteristike samih pogonskih grupa. Ono što razlikuje moderne od starijih dizajna je upravo modularan pristup, gdje se pogonski sustav može rastaviti na više tzv. 'modula'. Svaki od tih modula prikazuje funkcionalan segment nekog pogonskog sustava, npr kompresor, komoru izgaranja, turbinu, itd. Istraživanja koja su provedena kod zapadnih zemalja koja upotrebljavaju zrakoplove Ruske proizvodnje pokazuju da su i ti motori pogodni za modularno održavanje, iako nisu predviđeni za to za vrijeme njihovog dizajna. Ovim radom prikazana je mogućnost primjene tog tipa održavanja na motoru *Klimov TV3-117*, upotrebljavanom na helikopteru *Mil Mi171sh*. Hrvatsko ratno zrakoplovstvo bi implementacijom ove metode moglo doći do značajne uštede resursa i oboljšane pouzdanosti svojih pogonskih sustava. Konačno, važno je naglasiti da se novije inačice ovog motora, *Klimov VK-2500* održavaju po stanju, upravo zbog primjene u civilnom zrakoplovstvu. Noviji motori ovog tipa vuku svoj korijen upravo u ovom motoru, te je sa minimalnim modifikacijama moguće provesti održavanje praćenjem radnih parametara.

8. POPIS LITERATURE

- [1] *TB3 117 Maintenance manual – Books 1,2,3* – 15.1.1986
- [2] Konstrukcija i eksploatacija motora TV3-117- URL:
<https://tehclub.site/storage/products/07-20/konstruktsiya-i-ekspluatatsiya-dvigatelya-tv3117v.pdf>
- [3] Tehnička eksploatacija i održavanje zrakoplova, Bazijanac E., Zagreb, 2007.
- [4] Autorizirana predavanja, Održavanje zrakoplova, Bazijanac E, Domitrović A., Gerhardinger D., Fakultet Prometnih Znanosti, Zagreb, 2020.
- [5] https://flymotorsich.com/upload/files/Mi-8MSB_and_Mi-2_english.PDF
- [6] *Implementation of an Engine Condition Trend Monitoring (ECTM) program in a Part M organisation Pratt & Whitney PT6A-67D Engine, de Mesquita Guimareas D.M.Q.R., Covilha, 2015.*
- [7] *Aircraft Gas Turbine Engine Vibration Diagnostic, Fabry S., Ceskovic M., Czech Technical University in Prague, 2017*
- [8] <http://www.komteh.hr/geo-fennel-fve100-video-borescope&productID=317>)
- [9] <https://yenaengineering.nl/non-destructive-test-ndt-methods/>
- [10] https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-magnetic-particles-nondestructive-testing_fig1_322704024
- [11] https://www.researchgate.net/figure/Working-principle-of-radiographic-test-34-35_fig2_287471979
- [12] <https://www.linkedin.com/pulse/ndt-ultrasonic-testing-salman-cader>
- [13] *WebECTM & Trend Analysis training manual, Pratt & Whitney Canada, 2006*
- [14] *GPMS – Brochure – Predictive Health & Usage Monitoring for the Mil Mi 8/17/171*
- [15] <https://verticalmag.com/press-releases/gpms-receives-approval-to-install-foresight-mx-on-mi-8-17-171-series-helicopters/>
- [16] *On condition maintenance for non modular jet engines, Siladic M.F., Rasuo B., Faculty of Mechanical Engineering, Department of Aeronautics, Belgrade, 2009.*
- [17] <https://electroexp.com/hr/chto-takoe-vixrevye-toki.html>
- [18] Monitoring i analiza trenda tehničkih parametara mlaznim motora u eksploataciji, Eleršek L., Zagreb, 2004.
- [19] <https://engineering.purdue.edu/~propulsi/propulsion/jets/tprops/pw100.html>

- [20] https://www.researchgate.net/figure/Layout-of-typical-PT6A-engine_fig1_277770160
- [21] Autorizirana predavanja Održavanje zrakoplova, Bazijanac E., Virovac D., Šegvić M., Veleučilište Velika Gorica, 2019.
- [22] <https://aviation.stackexchange.com/questions/47532/what-is-the-range-of-frequencies-of-vibration-in-a-helicopter-due-to-the-main-ro>
- [23] <https://www.airplane-pictures.net/photo/916083/221-croatia-air-force-mil-mi-171/>

9. POPIS SLIKA

| | |
|----------------|----|
| Slika 1 | 3 |
| Slika 2 | 5 |
| Slika 3 | 6 |
| Slika 4 | 7 |
| Slika 5 | 7 |
| Slika 6 | 8 |
| Slika 7 | 9 |
| Slika 8 | 10 |
| Slika 9 | 13 |
| Slika 10 | 18 |
| Slika 11 | 20 |
| Slika 12 | 22 |
| Slika 13 | 24 |
| Slika 14 | 25 |
| Slika 15 | 26 |
| Slika 16 | 27 |
| Slika 17 | 28 |
| Slika 18 | 29 |
| Slika 19 | 29 |
| Slika 20 | 30 |
| Slika 21 | 31 |
| Slika 22 | 33 |
| Slika 23 | 33 |
| Slika 24 | 35 |

| | |
|----------------|----|
| Slika 25 | 37 |
| Slika 26 | 40 |
| Slika 27 | 41 |
| Slika 28 | 41 |

10. POPIS TABLICA

| | |
|----------------|----|
| Tablica 1..... | 4 |
| Tablica 2..... | 11 |
| Tablica 3..... | 12 |

11. POPIS KRATICA

HRZ – Hrvatsko Ratno Zrakoplovstvo

FCU – *Fuel Control Unit*

N – Broj okretaja (%)

EASA – *European Union Safety Agency*

ECTM – *Engine Condition Trend Monitoring*

FDAU – *Flight Data Aquisition System*

ADAS – *Aircraft Data Aquisition System*

EGT – *Exshhaust Gas Temperature*

ACAFC – *Aircraft Communications Adressing and Reporting System*

VHF – *Very High Frequency*

FF – *Fuel Flow*

OAT – *Outside Air Temperature*

TQ – *Torque*

Palt – *Altitude Pressure*

ITT – *Inter Turbine Pressure*

NDT – *Non Destructive Testing*

UV – *Ultra Violet*

FAA – *Federal Aviation Administration*

DTB – *Dynamic Test Board*

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

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 diplomskog rada pod naslovom Održavanje pogonskog sustava helikoptera Mil Mi 171sh praćenjem radnih parametara, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 6.3.2023

Martina Karamčić
(ime i prezime, potpis)