

Održavanje turboelisnog motora PT 6 na temelju praćenja radnih parametara

Brus, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:119:143732>

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

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



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOST**

Karlo Brus

**ODRŽAVANJE TURBOELISNOG MOTORA PT 6 NA
TEMELJU PRAĆENJA RADNIH PARAMETARA**

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 7. travnja 2020.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Eksploatacija i održavanje zrakoplova**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 5636

Pristupnik: **Karlo Brus (0285005559)**
Studij: **Aeronautika**
Smjer: **Pilot**
Usmjerenje: **Vojni pilot**

Zadatak: **Održavanje turboelasnog motora PT 6 na temelju praćenja radnih parametara**

Opis zadatka:

U radu je potrebno analizirati vrste i načine održavanja zrakoplova s posebnim osvrtom na metode kontinuiranog praćenja stanja. Na primjeru turboelasnog motora PT 6 na zrakoplovu Pitatus PC-9 potrebno je razraditi metode otkrivanja neispravnosti i postupke održavanje motora na temelju praćenje trenda radnih parametara motora tijekom leta.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

izv. prof. dr. sc. Anita Domitrović

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

**ODRŽAVANJE TURBOELISNOG MOTORA PT 6 NA
TEMELJU PRAĆENJA RADNIH PARAMETARA
MAINTENANCE OF PT 6 TURBOPROP ENGINE BASED ON
OPERATING PARAMETERS MONITORING**

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Anita Domitrović

Student: Karlo Brus

JMBAG: 0285005559

Zagreb, rujan 2020.

Sažetak

U radu su analizirani postupci održavanja turboelisnog motora P&W PT6 na zrakoplovu Pilatus PC-9. Cilj je da se kroz kratak osvrt na osnovne karakteristike zrakoplova i princip rada motora PT6 uvede u načine održavanja zrakoplova i motora. Opisani su načini održavanja i zrakoplovni propisi koje propisuju nadležna tijela te su, u odnosu na veličinu i slijed pregleda, navedeni svi popravci, remont i pregledi koji se provode tijekom životnog vijeka zrakoplova i njegova motora. Održavanje motora i njegovih komponenti detaljno su opisani u cjelini gdje je naveden svaki pregled zrakoplova nakon određenog broja sati leta, određenog vremenskog intervala ili broja slijetanja. Koji se parametri prate, kako se otkrivaju neispravnosti i na koji način se ispravljaju opisano je analizom praćenja radnih parametara motora.

KLJUČNE RIJEČI: Održavanje, Pilatus PC-9, motor PT6, praćenje radnih parametara motora

Summary

The thesis analyzes the maintenance procedures of the P&W PT6 turboprop engine on the Pilatus PC-9 aircraft. The aim is to introduce a brief overview of the basic characteristics of the aircraft and the principle of operation of the PT6 engine in the ways of maintaining the aircraft and the engine. The methods of maintenance and aviation regulations prescribed by the competent authorities are described, and, in relation to the size and sequence of inspections, all repairs, overhauls or inspections carried out during the life of the aircraft and its engine are listed. The maintenance of the engine and its components is described in detail in the ensemble in which each inspection of the aircraft after a certain number of flight hours, a certain time interval or the number of landings is listed. Which parameters are monitored, how faults are detected and how they are corrected is described by the analysis of the engine condition monitoring.

KEY WORDS: Maintenance, Pilatus PC-9, engine PT6, engine condition monitoring

Sadržaj

| | |
|--|----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. VRSTE I NAČINI ODRŽAVANJA ZRAKOPLOVA I MOTORA..... | 2 |
| 2.1. Zrakoplovni propisi koji se tiču održavanja zrakoplova | 2 |
| 2.1.1 PART 145 | 2 |
| 2.1.2. PART M | 3 |
| 2.2. Općenito o programu održavanja | 3 |
| 2.3. Pregledi koji čine program održavanja..... | 4 |
| 2.4. Tipovi održavanja | 6 |
| 3. TEHNIČKO-EKSPLOATACIJSKE KARAKTERISTIKE MOTORA PT6 NA ZRAKOPLOVU PILATUS PC-9 | 8 |
| 3.1. Tehničko-eksploatacijske karakteristike zrakoplova Pilatus PC-9..... | 8 |
| 3.2. Motor PT-6A | 10 |
| 4. ODRŽAVANJE MOTORA PT6 NA ZRAKOPLOVU PC-9..... | 12 |
| 4.1. Ograničenja plovidbenosti i zadaci nakon isteka resursa | 12 |
| 4.2. Pregledi na motoru PT6 zrakoplova Pilatus PC-9..... | 12 |
| 4.3. Motorski instrumenti i parametri koji omogućuju ECTM..... | 15 |
| 5. PRAĆENJE TRENDRA RADNIH PARAMETARA MOTORA TIJEKOM LETA U CILJU PROCJENE STANJA MOTORA I OTKRIVANJE NEISPRAVNOSTI (<i>Engine Condition Trend Monitoring</i> - ECTM) | 17 |
| 5.1. Praćenje stanja motora..... | 17 |
| 5.2. ECTM na zrakoplovu Pilatus PC9-M..... | 17 |
| 5.3. Postupak snimanja parametara i provjera snage..... | 18 |
| 6. ZAKLJUČAK..... | 21 |
| LITERATURA | 22 |
| POPIS SLIKA..... | 23 |
| POPIS TABLICA | 24 |

1. UVOD

Zrakoplov Pilatus PC9 kao i svaki drugi zrakoplov da bi bio kontinuirano plovidben potrebno ga je propisno održavati prema standardima i pravilima koja su izdana od nadležnih organizacija.

Cilj rada je, pomoću prikupljene literature, na primjeru turboelisnog motora PT6 na zrakoplovu Pilatus PC9 prikazati cikluse i procedure održavanja tijekom životnog vijeka zrakoplova te na koji način se, pomoću praćenja radnih parametara motora, otkrivaju neispravnosti u radu.

Rad se sastoji od 6 poglavlja:

1. Uvod
2. Vrste i načini održavanja zrakoplova i motora
3. Tehničko-eksploatacijske karakteristike motora PT6 na zrakoplovu Pilatus PC-9
4. Održavanje motora PT6 na zrakoplovu PC 9
5. Praćenje trenda radnih parametara motora tijekom leta u cilju procjene stanja motora i otkrivanje neispravnosti (*Engine Condition Trend Monitoring, ECTM*)
6. Zaključak

U uvodnom poglavlju naveden je cilj i struktura završnog rada. Načini održavanja zrakoplova uz prikaz održavanja općenito, preglede koji ga čine i regulative koje ga propisuju prikazani su u drugom poglavlju. U trećem je poglavlju opisan sam zrakoplov Pilatus PC-9 i prethodni tip iz kojega je izveden te prikazuje motor i princip njegova rada, navedeni su određeni dijelovi turboprop motora te osnovne tehničke karakteristike. U četvrtom poglavlju opisani su svi pregledi, remont, zamjene dijelova i radovi na zrakoplovu od pregleda s najkraćim intervalom do isteka resursa samog zrakoplova. Praćenje radnih parametara motora tijekom leta i otkrivanje neispravnosti njihovom analizom opisano je u petom poglavlju. U šestom, zaključnom poglavlju, iznesen je zaključak ovog završnog rada.

2. VRSTE I NAČINI ODRŽAVANJA ZRAKOPLOVA I MOTORA

Pojam održavanje zrakoplova obuhvaća sve radnje i postupke kojima se zrakoplov, odnosno, sredstvo za rad, održava ispravnim. U ovom poglavlju opisani su: zrakoplovni propisi koji se tiču održavanja zrakoplova, program održavanja općenito, zatim, pregledi koji ga čine te tipovi održavanja zrakoplova.

2.1. Zrakoplovni propisi koji se tiču održavanja zrakoplova

Svako održavanje zrakoplova, bilo nakon određenog broja letova ili letnih sati, provodi se po međunarodnim i nacionalnim normama i propisima. Norme i propise vezane uz održavanje zrakoplova propisuje Međunarodna organizacija za civilno zrakoplovstvo (*engl. International Civil Aviation Organization – ICAO*). ICAO je specijalizirana ustanova Ujedinjenih naroda, osnovana 1944. godine u Chicagu, a zadužena je za stalni nadzor uvođenja i provođenja Konvencije o međunarodnom civilnom zrakoplovstvu, odnosno, Čikaške konvencije.

Europska agencija za sigurnost zračnog prometa (*engl. European Aviation Safety Agency - EASA*) je agencija Europske unije sa sjedištem u Kölnu. Agencija ima posebne regulatorne i izvršne zadatke u oblasti sigurnosti zrakoplovstva. Jedna od bitnijih nadležnosti Agencije je certificiranje tipova zrakoplova i njegovih komponenti, kao i davanje ovlasti organizacijama uključenim u projektiranje, izradu i održavanje zrakoplovnih proizvoda. [2]

Propisi koji propisuju procedure i standarde organizacije za održavanja i za osiguranje kontinuirane plovidbenosti su Part 145 i Part M.

2.1.1 PART 145

Za održavanje zrakoplova i njegovih komponenti postoje organizacije koje moraju biti ovlaštene po svim stavkama pravilnika i zakona koje propisuju nadležna tijela. AMO (*engl. Approved Maintenance Organization*), odnosno, ovlaštena organizacija za obavljanje održavanja zrakoplova, može dobiti Part 145 certifikat ukoliko zadovoljava sve uvjete (ispravnost i suvremenost alata za provedbu, licencirano osoblje i Priručnik organizacije za održavanje zrakoplova) za pravilnu i propisanu provedbu održavanja.

MOE (*engl. Maintenance Organisation Exposition*) je priručnik koji prikazuje rukovodnu strukturu, tehnološke i organizacijske procese te sustave kvalitete. [1]

Part 145 propisuje koja tehnička struktura, kako i kada popravlja ili mijenja zrakoplovne komponente, odnosno, izdavanje dozvola za održavanje zrakoplova, rad radionica ili o produljenju resursa zrakoplova ili njegovih komponenti.

2.1.2. PART M

Part M odnosi se na stalnu plovidbenost zrakoplova i zrakoplovnih komponenti, dijelova ili uređaja, uz odobrenje organizacija i osoblja uključenog u zadatke održavanja zrakoplova. Drugim riječima, ukoliko tijekom leta bude eventualnih otkaza opreme i uređaja, a koji ne ugrožavaju sigurnost zrakoplova, zrakoplov je plovidben. Propisuje potrebne procedure koje će osigurati stalnu plovidbenost te koje će nakon upotrebe zrakoplova osigurati njegovu daljnju eksploataciju. Dijeli se na sljedeće odjeljke: [2]

- A. Općenito;
- B. Odgovornost;
- C. Kontinuirana plovidbenost;
- D. Standardi održavanja;
- E. Komponente;
- F. Organizacija za održavanje
- G. Organizacija za kontinuiranu plovidbenost;
- H. Potvrda o puštanju u rad;
- I. Valjanost potvrde o plovidbenosti.

Part M i Part 145 su najvažniji propisi koji propisuju procedure i standarde organizacije za održavanja i propisi koji propisuju procedure i standarde za osiguranje kontinuirane plovidbenosti.

2.2. Općenito o programu održavanja

Održavanje zrakoplova je skup aktivnosti s ciljem da se sredstvo u eksploataciji održi ispravnim. Održavanjem zrakoplova osigurava se očuvanje potrebne razine sigurnosti i pouzdanosti uz poštivanje zakonskih propisa i kontrolu troškova. Program održavanja je definiran zakonskim regulativama i propisima, a sadrži sve postupke održavanja te kada i kako

će se provoditi. U pregledima predviđenima u Programu održavanja, kojeg piše operater, moraju se predvidjeti redoviti pregledi s obzirom na nalet, broj letova i kalendarske rokove te godišnji pregled koji se u pravilu obavlja prije provjere plovidbenosti. [1]

Održavanje zrakoplova tijekom njegove eksploatacije propisano je i definirano u programu održavanja. Izrađuje ga operater, odnosno, organizacija koja izrađuje dokumentaciju za program održavanja. Vlasnik zrakoplova ili operater ga daje na odobrenje zrakoplovnim vlastima zemlje u čijem je zrakoplov registru. Cilj održavanja zrakoplova je da zrakoplov bude konstrukcijski pouzdan te da se održi pouzdanost pogonske grupe, sustava i ostalih komponenti zrakoplova, a da se pritom maksimalno smanje troškovi. [1]

Zrakoplovnim vlastima se daje na odobrenje program održavanja koji je i uvjet za dobivanje svjedodžbe o plovidbenosti zrakoplova te sposobnosti organizacije ili operatera. Organizacija odgovorna za održavanje zrakoplova mora obavljati analize efikasnosti, otklanjati nedostatke te osiguravati kontinuiranu plovidbenost zrakoplova. Za primjenu odobrenog programa održavanja, operater zrakoplova mora osigurati potpunu realizaciju radova ili ugovorom obvezati drugu zrakoplovno-tehničku organizaciju koja zadovoljava uvjete održavanja po stručnosti osoblja i opreme. Odgovornost za poštivanje programa održavanja snosi operater zrakoplova. [1]

2.3. Pregledi koji čine program održavanja

Planirano održavanje smatra se preventivnim održavanjem i unaprijed je određeno zadanim intervalima, dok se neplanirano održavanje smatra korektivnim te je teško predvidivo. Planirano održavanje izvodi se u skladu s programom održavanja koji specificira maksimalne intervale pojedinih obaveznih radova na zrakoplovu.

Intervali su određeni:

- po satima naleta
- po broju slijetanja - za stajni trap, zakrilca, životni vijek nadtlačene kabinem i sl.
- po broju “ciklusa” - za motore- (interval od pokretanja do gašenja motora), omjer FH/FCY pokazatelj eksploatacije
- Kalendarsko vrijeme (mjeseci, godine)- provjera korozije, gumenih brtvi, ulja i sl.

U program održavanja ubrajaju se pregledi koji su prema opsegu i prirodi posla podijeljeni u 6 glavnih grupa [1]:

1. Servisni pregledi
2. Povremeni pregledi
3. Radovi velike obnove/blok pregledi
4. Posebni pregledi
5. Pregledi - provjere u letu
6. Pregledi za utvrđivanje plovidbenosti zrakoplova

1. *Servisni pregledi* uključuju otklanjanje kvarova, obuhvaćaju predpoletne, tranzitne, dnevne preglede (nakon posljednjeg leta u toku dana) i preglede namijenjene servisnim i preventivnim radovima (podmazivanje uređaja, izmjenu dijelova, probe sustava i sl.).

2. *Povremeni pregledi* uključuju preglede koji obuhvaćaju radove redovitog održavanja koji se ponavljaju u izvjesnim vremenskim razdobljima, otklanjanje kvarova i obavljanje manjih modifikacija. Podijeljeni su po vremenskim intervalima nakon kojeg zatvaraju jedan ciklus, te se isti iznova ponavlja.

3. *Radovi velike obnove (overhaul)* obuhvaćaju skidanje većine uređaja sa zrakoplova, njihov detaljni pregled i funkcionalno ispitivanje, pregled i ispitivanje njihovih instalacija, pregled i ispitivanje strukture zrakoplova, otklanjanje svih nađenih nedostataka, strukturalne radove većeg obujma, veće modifikacije, otklanjanje korozije sa svih površina, obnavljanje interijera, boje i drugih vidova površinske zaštite, kao i radove preventivnog održavanja. Cijeli program radova obnove zrakoplova se može obaviti odjednom (nakon isteka propisanog vremena) ili u etapama. Kod obnove u etapama svaka etapa se naziva "blok pregledom" i ovakav način obnove predstavlja obnovu po progresivnom programu održavanja. Sve etape ovakve obnove moraju se završiti u propisanom vremenu. Propisano vrijeme za radove obnove izraženo je u satima naleta a može biti ograničeno i vremenski.

4. *Posebni (specijalni) pregled*: obavljaju se kada se zrakoplov nađe u nepredviđenim situacijama gdje je moglo doći do preopterećenje konstrukcije, prelaska sigurne brzine, oštećenja oplata i drugih za zrakoplov nepovoljnih posljedica. Ovi pregledi se pregledi se obavljaju prema radnim karticama specijalnih pregleda.

5. *Provjere u letu (probni letovi)* predstavlja provjeru performansi zrakoplova, odaziv svih funkcija, sustava i uređaja tijekom svih faza leta. Prema Zakonu o zračnom prometu

Republike Hrvatske, provjere u letu zrakoplova upisanih u stalni registar, ili prijavljenih za upis, obavljaju se u slijedećim slučajevima:

- ukoliko je zrakoplov nov,
- prilikom provjere plovidbenosti nakon većih pregleda,
- nakon većih modifikacija i popravaka koji bi mogli imati za posljedicu promjenu osnovnih performansi zrakoplova,
- nakon zamjene većih zrakoplovnih komponenti ili nosećih struktura,
- kada se ispitivanja ne mogu uspješno obaviti na zemlji,
- nakon zamjene jednog motora kod klipnih, odnosno zamjene dva ili više mlaznih motora na višemotornom mlaznom zrakoplovu,
- nakon rastavljanja ili zamjene komandi leta,
- kad zrakoplovne nadležne vlasti to zahtijevaju u interesu sigurnosti zračnog prometa.

6. Pregledi za utvrđivanje plovidbenosti zrakoplova predstavlja preglede kojima se utvrđuje je li zrakoplov, odnosno zrakoplovni sustavi, oprema i ostale komponente sposobni za sigurnu zračnu plovidbu pridržavajući se pritom odredbi Zakona o zračnom prometu i drugih propisa i zahtjeva. [1]

2.4. Tipovi održavanja

Razvojem zrakoplovstva počeli su se razvijati, ali i pratiti propisi o resursima i održavanju motora zrakoplova. U početku su se, na temelju prikupljenog znanja i iskustava o resursima, sustavi održavanja zasnivali na modelu preventivnog održavanja. Takav način održavanja imao je unaprijed određene resurse (*Hard Time Limit*) do zamjene ili remonta motora. Aktivnosti održavanja provodile su se planski, odnosno prema određenom resursu na sredstvu koje je ispravno ili se smatra da je ispravno jer nije uočen otkaz. Radi ovakvog načina održavanja često su se događala nepotrebna rastavljanja motora i komponenti koji su još uvijek imali dovoljno resursa za obavljanje leta. Samim time povećavali su se troškovi održavanja, a smanjilo vrijeme eksploatacije samog zrakoplova.

Poslije drugog svjetskog rata razvio se sustav održavanja „prema stanju“ (*On condition*) što je vrsta preventivnog održavanja. Temelji se na testiranjima nakon određenog vremenskog intervala radi provjere i utvrđivanja stanja te se, ukoliko je potrebno, izvršavaju korekcije kako bi se spriječio otkaz. Cilj je izbjeći nepotrebne i prijevremene zamjene komponenti zrakoplova radi poboljšanja ekonomičnosti održavanja.

Uz preventivno, postoji i korektivno održavanje kod kojeg se komponenti zrakoplova vraćaju operativna svojstva tek nakon otkaza. Aktivnosti korektivnog održavanja su: uočavanje i lokacija otkaza, rastavljanje, popravak, sastavljanje, ugradnja, testiranje, provjera i verifikacija. Ova vrsta održavanja se primjenjuje na elementima kod kojih otkaz ne ugrožava sigurnost letenja.

Šezdesetih godina razvija se sustav održavanja temeljen na programima pouzdanosti (*engl. Reliability Centered Maintenance - RCM*) što je značilo prevenciju otkaza. Rezultat je bio identifikacija koja vrsta održavanja se primjenjuje za određeni otkaz. Razvojem tehnologije senzora razvilo se i stalno praćenje stanja sustava (*engl. Condition Monitoring*). Korištenjem ovog načina, parametri koji pokazuju rad motora su glavni pokazatelji i indikacija kvara ili isteka resursa. Zbog takve koncepcije i načina održavanja moguća je zamjena samo komponente zrakoplova kojoj je istekao resurs, a ne slanja cijelog motora zrakoplova na remont i nepotrebno povećavanje troškova uz smanjenje iskoristivosti samog zrakoplova.

3. TEHNIČKO-EKSPLOATACIJSKE KARAKTERISTIKE MOTORA PT6 NA ZRAKOPLOVU PILATUS PC-9

Pilatus PC-9 je školski zrakoplov kojeg je dizajnirala švicarska tvrtka *Pilatus Aircraft Limited*. Namijenjen je za obuku pilota i laka borbena djelovanja uz manje modifikacije. Zrakoplov je izveden na platformi prethodnog zrakoplova Pilatus PC-7. PC-9M predstavljen je 1997. godine kao novi standardni model. Uz poboljšanja u konstrukciji, unaprijeđena je kontrola rada motora i propelera. [3] U ovom poglavlju opisane su tehničko eksploatacijske karakteristike zrakoplova Pilatus PC-9 i njegove pogonske jedinice, turboelisnog motora PT6.

3.1. Tehničko-eksploatacijske karakteristike zrakoplova Pilatus PC-9

Pilatus PC-9 je niskokrilni, jednomotorni zrakoplov s turboelisnim motorom, metalne konstrukcije s uvlačećim stajnim trapom. Na slici 1. je prikazan zrakoplov Pilatus PC-9 Hrvatskog ratnog zrakoplovstva.



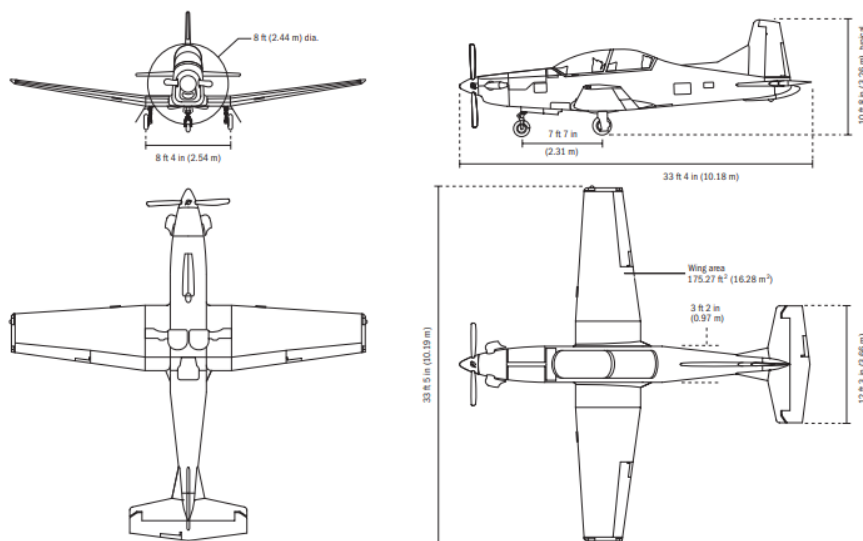
Slika 1. Pilatus PC-9M Hrvatskog ratnog zrakoplovstva [4]

Zrakoplov je opremljen motorom proizvođača Pratt & Whitney Canada PT6A-62 s 950 HP (708 kW) i aluminijskom četverokrakom elisom proizvođača Hartzell. U tablici 1. prikazane su osnovne tehničke karakteristike zrakoplova Pilatus PC9. [3]

Tablica 1: Tehničke karakteristike [3]

| | |
|--|-----------------------|
| Posada | 1 ili 2 pilota |
| Dužina | 10.7 m |
| Raspon krila | 10.12 m |
| Visina | 3.26 m |
| Površina krila | 16.3 m |
| Masa praznog zrakoplova (<i>Empty weight</i>) | 1725 kg |

Slika 2. prikazuje vanjski izgled zrakoplova Pilatus PC-9 i njegove dimenzije.



Slika 2. Izgled i dimenzije [5]

PC-9 M predstavljen je 1997. godine kao novi standardni model na kojemu su povećani vertikalni stabilizator radi stabilnosti i modifikacije na oplatama krila, unaprijeđena je i kontrola rada motora i propelera. Eksploatacijske karakteristike za zrakoplov Pilatus PC-9 prikazane su tablicom 2.

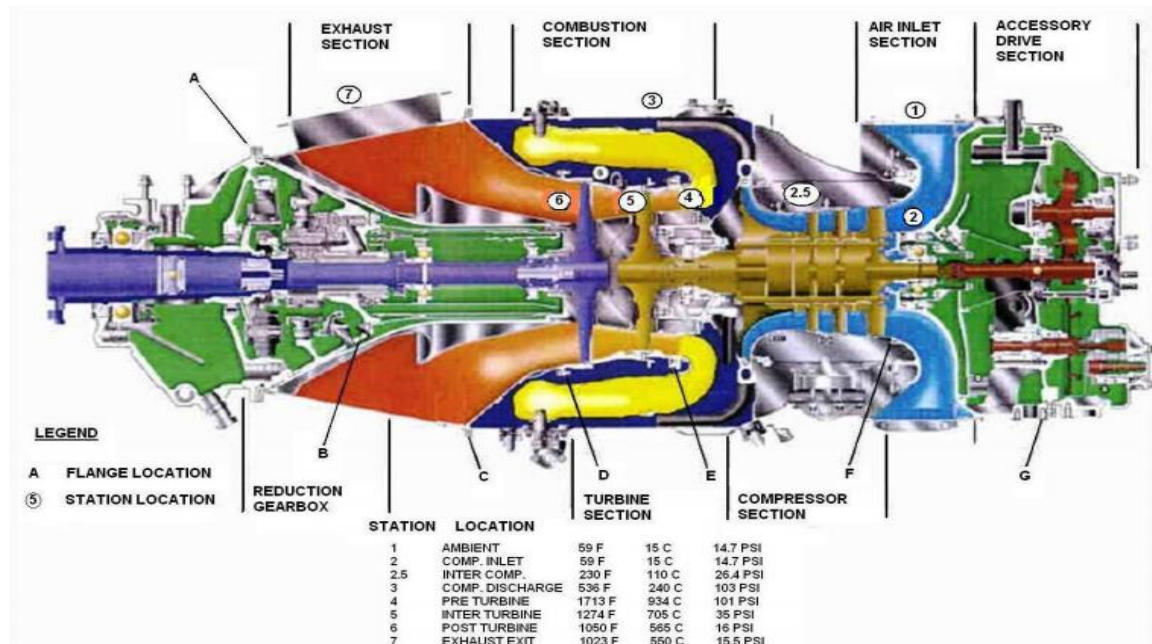
Tablica 2: Eksploatacijske karakteristike zrakoplova Pilatus PC-9 [3]

| | |
|---|--------------------|
| Maksimalna brzina | 320 kt (593 km/h) |
| Dolet | 830 nmi (1537 km) |
| Plafon leta | 37990 ft (11580 m) |
| Duljina potrebna za polijetanje pri ISA/SL | 1280 ft (391 m) |
| Duljina potrebna za slijetanje pri ISA/SL | 2295 ft (700 m) |

3.2. Motor PT-6A

Motori PT-6A tvrtke P&W Canada su laki turboelisni motori sa slobodnom turbinom. Ovi motori ugrađeni su u zrakoplove Pilatus PC9 u varijanti motora PT6A-62 koji se dijeli na dvije nezavisne cjeline: jednu koja pokreće kompresor u dijelu tzv. plinskog generatora (kompresor) i drugu (dvostupanjska pogonska turbina) koja pokreće vratilo propelera preko reduktora sa prijenosnim omjerom 16:1.

Zrak ulazi u motor kroz prstenastu komoru formiranu od ulaznog kućišta kompresora gdje se zrak usmjerava prema prednjem dijelu kompresora koji je smješten uz pogonske turbine u centru motora s tom razlikom da im se vratila produžavaju u suprotnim smjerovima. Ovakva konfiguracija osigurava jednostavnu ugradnju i pregled motora. [6] Na slici 5. vidi se uzdužni presjek turboelisnog motora PT6 s glavnim dijelovima.



Slika 3. Motor PT6 [7]

Primarni zrak (25%) se miješa s gorivom. Smjesa zraka i goriva pali se svjećicom, a rezultatna ekspanzija plinova se usmjerava prema turbinama. Smještaj samog sklopa komore izgaranja eliminira potrebu za drugim vratilom između kompresora i turbine kompresora te na taj način, smanjujući ukupnu dužinu i masu motora. Gorivo se ubrizgava u komoru izgaranja kroz 14 SIMPLEX brizgaljki smještenih u dva kompleta po 7 radi lakšeg pokretanje motora. Gorivo se prema njima dovodi putem dvojnih gorivnih sabirnica koje se sastoje od primarnih i sekundarnih cjevovoda i njima pridruženih adaptera. Smjesa gorivo-zrak pali se putem dviju svjećica koje ulaze kroz oblogu komore izgaranja. Plinovi nastali ekspanzijom mijenjaju smjer

strujanja i prolaze kroz usmjeravajuće lopatice turbine kompresora prema jednostupanjskoj turbini. Usmjeravajući (statorski) dio turbine kompresora osigurava da plinovi nastali izgaranjem u svojoj ekspanziji udaraju na lopatice pod pravilnim kutom sa minimalnim gubitkom energije. Plinovi se tada u svojoj daljnjoj ekspanziji usmjeravaju prema slobodnoj turbini. Dvostupanjska slobodna turbina sastoji se od ulaznih usmjeravajućih lopatica prvog stupnja te rotorskog dijela i od ulaznih usmjeravajućih lopatica drugog stupnja te rotorskog dijela koji pogoni vratilo propelera preko reduktora. [6]

Plinski generator motora pogoni pumpe uljnog sustava motora osiguravajući podmazivanje za sve klizne površine motora, tlak ulja za mjerenje zakretnog momenta (*torque*) i snagu za upravljanjem promjenom kraka elise. U tablici 3. navedene su osnovne karakteristike turboelisknog motora PT6. [6]

Tablica 3: Osnovne karakteristike motora [8]

| | |
|-------------------------|--|
| Kompresor | Trostupanjski aksijalni + jednostupanjski centrifugalni protočni kompresor |
| Komora izgaranja | Prstenaste dvostupanjske s 14 Simplex brizgaljki |
| Turbina | Turbina kompresora+slobodna turbina |
| Gorivo | Kerozin tip MIL-F-5624E / JP-4 / JP-5 |
| Uljni sustav | Tlačni sustav + crpni sustav + sustav odzračivanja |

4. ODRŽAVANJE MOTORA PT6 NA ZRAKOPLOVU PC-9

Postoje redoviti pregledi koji su vezani uz istek resursa, dakle, potrebna je promjena komponente zrakoplova nakon njenog roka uporabe bilo da je rok ograničen satima naleta, slijetanjima ili vremenski. Svi pregledi standardizirani su i provode se po odobrenom Programu održavanja.

4.1. Ograničenja plovidbenosti i zadaci nakon isteka resursa

Kod održavanja motora PT6 zrakoplova Pilatus PC9 postoje propisani i normirani pregledi raspoređeni po broju letnih sati ili po broju letova. Sukladno radnoj kartici 150 satnog povremenog pregleda odobrenog Programa održavanja izvršava se pregled nakon 150 letnih sati i to je ujedno najučestaliji pregled na zrakoplovu. Postoje još i pregledi nakon :

- 300 sati leta ili 12 mjeseci,
- 600 sati leta ili 2 godine,
- 1000 sati leta,
- 2000 sati leta,
- 3000 sati leta,
- 6000 sati leta
- 8000 sati leta

Također pregledi se normiraju i po broju slijetanja te tako imamo pregled nakon:

- 8000 slijetanja,
- 10000 slijetanja,
- 15000 slijetanja

Životni vijek zrakoplova Pilatus PC9 je 10000 sati leta iliti 20000 letova. U slijedećim poglavljima sažeti su pregledi samog zrakoplova Pilatusa PC9 i njegove pogonske jedinice motora PT6.

4.2. Pregledi na motoru PT6 zrakoplova Pilatus PC-9

Radni zadaci nakon 150 sati leta su:

- Akumulator- svi modeli osim modela SAFT A407CH3-P/N 976.17.33.303
Skidanje akumulatora radi servisiranja, pregledavanje ožičenja, odjeljaka akumulatora i otvora za provjetravanje, sukladno AMM (*engl. Aircraft maintenance manual*)

- Prvi stupanj kompresora te sam kompresor pregled

Više puta između 150 satnog pregleda provjeravati motorno ulje,ELT baterije, uložak hidrauličkog filtera niskog tlaka zamijena kada istekne resurs [6]

Nakon 300 sati leta određeni su sljedeći zadaci:

- Provjera korozije i pregled antikorozivnih elemenata
- ELT (predajnik pozicije u slučaju nužde) provjera postupcima pripisanima u AMM
- Gornji i donji okovi nosača motora sa oznakom P/N 553.10.09.122, 123, i 124 Boroskopska inspekcija vanjske i unutarnje prirubnice okova sukladno AMM
- Hamilton Sundstrand gorivna pumpa skidanje za pregled spojke na strani kutije pogona agregata na crveno-smeđu pojavu (tragovi željezova oksida). Ako su tragovi prisutni poslati pumpu u ovlaštenu servis.
- Regulator goriva u nuždi provođenje funkcionalne provjere [6]

Pregled i remont koji se obavljaju nakon 600 sati leta:

- Sustav klimatizacije-ventilator kondenzatora (P/N 959.90.01.240.)-skidanje za remont sukladno AMM
- Akumulator-SAFT A407CH3, P/N 976.17.33.403 (ako su ugrađene)-skidanje za generalni remont. Provjeravanje ožičenja, odjeljaka akumulatora i otvora za provjetranje. Zahtjevi ove točke pregleda istovjetni su i nadilaze zahtjeve pregleda točke 24307 (300 satni PP/Godišnji pregled) sukladno AMM
- Gorivni sustav-trup zrakoplova pregledavanje gorivnih cijevi i crijeva u prednjoj kabini
- Hidraulička pumpa podmazivanje pogonske osovine sukladno AMM (600 Fh ili 1 godina)
- Regulator brzine vrtnje propelera skidanje za remont
- Ulazna mrežnica gorivne pumpe čišćenje

- Vanjski filter gorivne pumpe zamjena
- Razvodni gorivni sustav i sklop gorivnih brizgaljki pregled
(svakih 450 Fh)
- Spojno vratilo gorivne pumpe (Hamilton Sundstrand gorivna pumpa)-pregled na trošenje i koroziju
- Komande motora pregled držača sajli PCL-a (*Power Control Lever*)
- Detektor opiljaka uljnog sustava i filter premošćivanje pinova na chip detectoru s prikladnim prenosnikom i provjera je li rad signalizacije kontinuiran. Ako ne radi slijedi zamijena chip detectora. Bilo koji strani materijal nađen na chip detectoru ili na glavnom uljnom filteru mora se prije daljnjih radnji identificirati. [6]

Pregledi nakon više od 1000 sati leta su:

- (1000 Fh) Starter/generator skidanje za remont sukladno AMM
- (1000 Fh ili 4 godine) Okviri pristupnih otvora krilnih spremnika goriva-pregled
- (1000 Fh) Pričvrtni vijci ublaživača vibracija motora na spoju s nosećim okvirom provjera momenta pritezanja : 56-68 Nm
- (1000 Fh) Filter element P3 zraka zamjena
- (1000 Fh) Element uljnog filtera zamjena
- (1000 Fh) Kutija pogona agregata- ulazni otvor unutarnje crpne uljne pumpe pregled i čišćenje po potrebi
- (1500 Fh) Vruća sekcija motora pregled + pregled pomoću boroskopa
- (3000 Fh) Motor skidanje za remont: rotirajuće komponente motora, vratilo propelera, motorski agregati, ublaživači vibracija motora te pričvrtni vijci ublaživača vibracija motora (pregled zbog korozije)
- (3000 Fh) Regulator goriva skidanje za pregled pogonskog sklopa/zamjene ležajeva

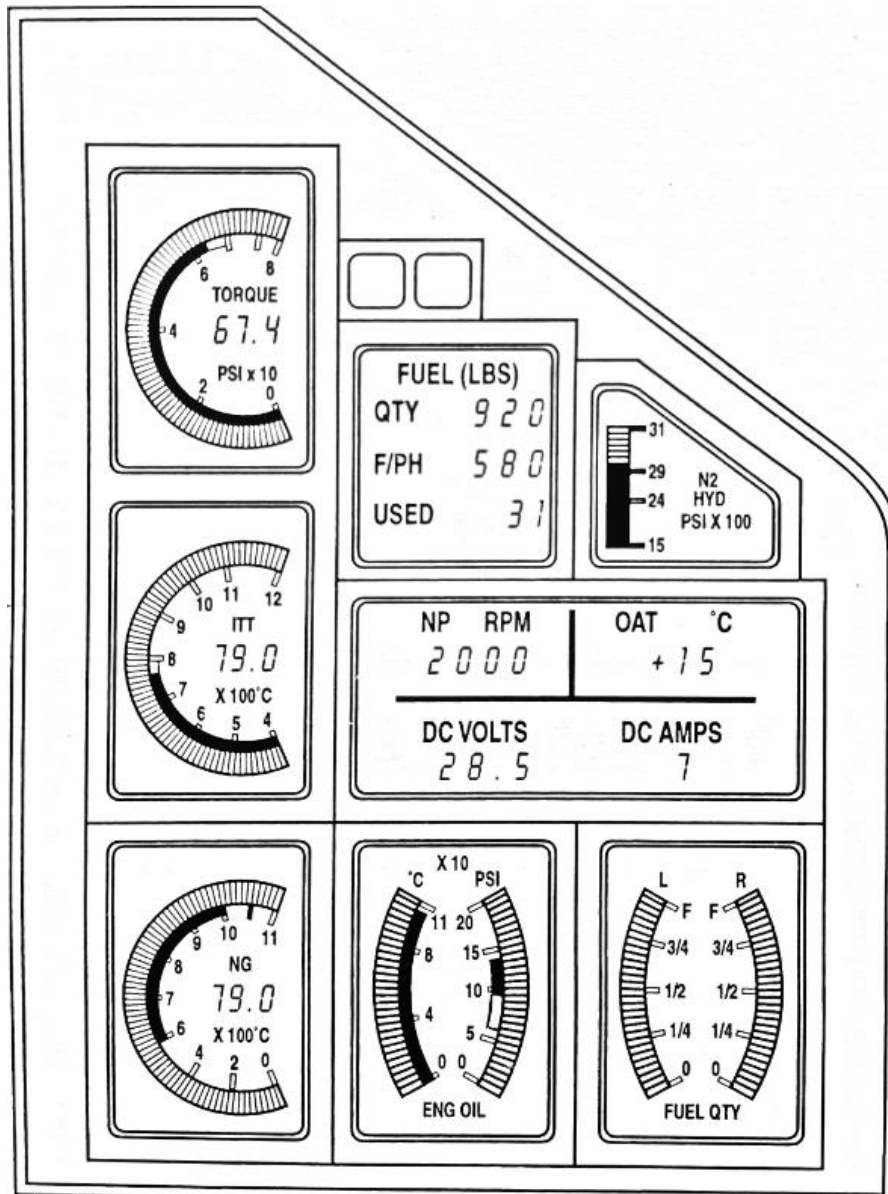
- (3000 Fh) ELU pretvorbeni ventil skidanje za zamjenu ležajeva faznog motora
- (3500 Fh) Sustav klimatizacije-spojni vijci pogonskog koloturnika kompresora zamjena
- (3500 Fh) Motorom pogonjena gorivna pumpa skidanje za remont sukladno AMM
- (nakon 5 godina) Spojevi cjevastog rešetkastog nosača motora i trupa-pregled radi korozije i napuknuća. Nalaz pregleda poslati proizvođaču aviona
- (5000 Fh) Vijci i matice cjevastog rešetkastog nosača motora zamjena
- (6000 Fh) Akrobatski gorivni spremnik skidanje za remont, zamjena stege sukladno CMM (*Component maintenance manual*)
- (8000 Fh) Hladnjak ulja motora zamjena radi isteka resursa [6]

4.3. Motorski instrumenti i parametri koji omogućuju ECTM

Svrha motorskih instrumenata i senzora je prikaz informacija o stanju motora koje se bilježe automatski tijekom svakog leta, a potrebne su za analizu trenda radnih parametara motora i planiranje održavanja. Na turboelisnom motoru PT6 bilježe se sljedeći podaci:

- Brzina vratila kompresora N_g
- Brzina vratila propelera N_p
- Temperatura i tlak ulja
- Temperatura između turbina ITT
- Okretni moment T_q
- Protok goriva W_f
- Temperatura okoline
- Barometarski tlak

Na slici 4. prikazani su motorski instrumenti zrakoplova Pilatus PC-9.



Slika 4. Motorski instrumenti zrakoplova Pilatus PC-9 [6]

5. PRAĆENJE TRENDRA RADNIH PARAMETARA MOTORA TIJEKOM LETA U CILJU PROCJENE STANJA MOTORA I OTKRIVANJE NEISPRAVNOSTI (*Engine Condition Trend Monitoring - ECTM*)

Engine Trend Monitoring je prikupljanje i analiza podataka o motoru radi otkrivanja kvarova, ubrzanog trošenja i ostalih oštećenja. Praćenjem radnih parametara motora i ispravljanjem, za atmosferske uvjete, moguće je nadzirati i održavati ispravnost i stabilnost zrakoplovnog motora. Problemi poput kvara kod vruće sekcije ili curenja motorskih tekućina mogu se otkriti, procijeniti i ispraviti prije nego što prerastu u neočekivani trošak, kvar ili čak prizemljenje. Ovakav način provjere kvarova omogućuje izbjegavanje skupih sekundarnih oštećenja motora zrakoplova i smanjenje predviđenog vremena za popravak. [9]

5.1. Praćenje stanja motora

Trend monitoring zahtijeva bilježenje parametara kao što su N1 / N2 o/min, ITT (*engl. Inter-turbine temperature*), protok goriva, OAT (*engl. Outside Air Temperature*) temperatura vanjskog zraka, brzina zraka i nadmorska visina. Daljnje informacije poput vibracija motora, temperature ulja i tlaka također pružaju preciznost podataka za analizu. Iako je moguće ručno prikupljanje tih podataka, daleko je preciznije i lakše automatski prikupiti očitavanja. [9]

Praćenje stanja motora, zrakoplova i sustava zrakoplova zasniva se na sljedećim metodama:

- Analiza parametara radnog procesa motora
- Vibracijska analiza
- Vizualni pregled: očni i pomoću boroskopa
- Analiza ulja za podmazivanje i produkata trošenja, analiza potrošnje ulja
- Metode nedestruktivnog ispitivanja elemenata.

Analiza parametara radnog procesa i vibroakustična analiza mogu se raditi na temelju parametara za vrijeme uporabe motora tijekom leta, a ostale metode podrazumijevaju snimanje parametara dok motor ne radi. [10]

5.2. ECTM na zrakoplovu Pilatus PC9-M

Tvrtka P&W Canada za motor PT6A u priručniku održavanja motora ECTM opisuje kao alat za rano planiranje preventivnih zahvata na motoru i alat za tehničku dijagnostiku.

Pomoću toga, osoblje za održavanje ima pristup ECTM tablicama preko kojih, praćenjem promjene parametara, otkrivaju moguće kvarove u ranoj fazi. U planu održavanja zrakoplova nije propisan ECTM kao baza niti ga je zakonski obvezno provoditi. Zrakoplov Pilatus PC9-M nema akvizicijski uređaj, ali implementacija ECTM-a ne može produljiti intervale navedene u Priručniku za održavanje zrakoplova. [11]

5.3. Postupak snimanja parametara i provjera snage

Izbor parametara radnog procesa koji se prate da bi se ocjenjivalo tehničko stanje motora ovisi o konstrukcijskog izvedbi samog motora. Primjena ECTM metode kod motora PT6 tvrtke Pratt&Whitney Canada ne zahtijeva posebno ulaganje u mjernu opremu jer se koriste podaci koji se očitavaju sa instrumenata u kabini zrakoplova, a parametri se bilježe tijekom leta. [11]

Potrebno je zabilježiti temperaturu okoline OAT i QFE (barometarski tlak, [mbar]).

Iz dijagrama je potrebno iščitati i odrediti:

- ITT,
- Ng (% o/min),
- Wf (lb/hr),
- ciljani moment sile (*engl. Target Torque*) za trenutne vanjske uvjete.

Nakon toga slijedi provjera performansi motora koja se provodi nakon što motor pet minuta radi na režimu *Ground Idle* radi stabilizacije radne temperature.

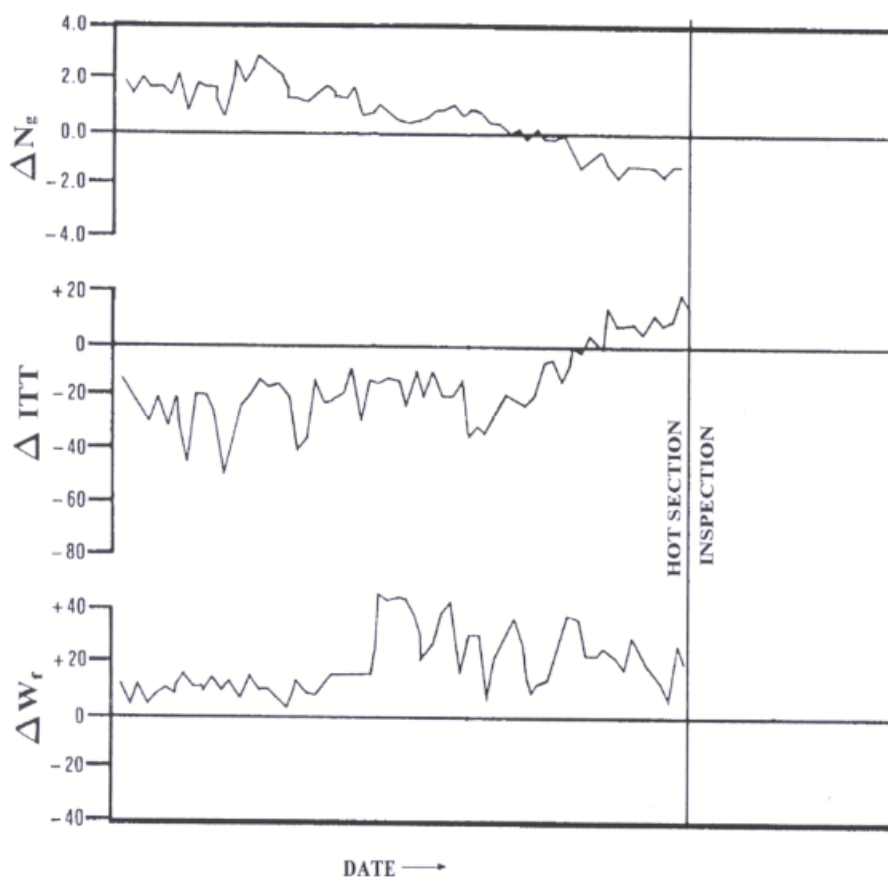
Važniji parametri su:

- Temperatura ulja min. 70°C,
- konfiguracija opterećenja mora biti BAT-OFF,
- Enviromental Control-OFF,
- Vapour Cycle-OFF,
- ručica snage PCL (*engl. Power Control Lewer*) treba biti postavljena na ciljani moment iščitani iz dijagrama.

Nakon stabilizacije instrumenata bilježe se podaci:

- Tq (psi),
- ITT,
- Ng,
- W.

Bilježe se za svaku kabinu te se uspoređuju s ranije određenim vrijednostima. Vrijednosti ΔW_f , ΔN_g i ΔITT ne smiju biti veće od prethodnih mjerenja niti smiju značajnije odstupati. Na slici 5.prikazane su promjene odstupanja parametara motora. [11]



Slika 5. Primjer promjene odstupanja parametara motora [11]

Tablica 4 :Rezultati provjera Power Assurance Check na motorima zrakoplova PC-9M [11]

| AC PC9M ev.br.:064, ENG PCE PL 0017 | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------------------|-------------|--------------------------|-------------|-------------|-----------|----------------------------|-------------|-------------|-----------|
| Np 2000rpm | STANJE OKOLINE | | OČITANJE IZ DIJAGRAMA | | | | OČITANO SA INSTRUMENATA | | | |
| | TT [h] | OAT [°C] | QFE [mbar] | Tq [psi] | ITT [°C] | Ng [%] | Wf [lb/hr] | Tq [psi] | ITT [°C] | Ng [%] |
| 1749 | 15 | 29.83 | 57 | 744 | 98.3 | 547 | 57 | 705 | 95.4 | 533 |
| 1624 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1499HSI | 15 | 30.05 | 57 | 744 | 98.3 | 555 | 57 | 695 | 95.3 | 526 |
| 1499HSI | 14 | 29.77 | 57 | 740 | 98.2 | 548 | 57 | 700 | 95.7 | 530 |
| 1250 | 33 | 29.71 | 57 | 775 | 100.1 | 518 | 57 | 755 | 97.6 | 534 |
| 999 | 17 | 29.21 | 57 | 750 | 98.7 | 538 | 57 | 706 | 95.5 | 532 |
| 750 | 24 | 29.82 | 57 | 772 | 99.8 | 555 | 57 | 736 | 96.9 | 533 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|----|-------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| 565 | 5 | 29.62 | 56.5 | 713 | 96.9 | 540 | 56.5 | 687 | 94.6 | 525 |
| 500 | 11 | 29.87 | 58 | 732 | 97.7 | 550 | 58 | 682 | 94.1 | 529 |
| 375 | 7 | 29.99 | 58.5 | 720 | 97 | 550 | 58.5 | 695 | 94.9 | 534 |
| 250 | 24 | 30.67 | 58.5 | 772 | 99.8 | 570 | 58.5 | 745 | 97.1 | 539 |

Tablica 5: Rezultati provjera Power Assurance Check na motorima zrakoplova PC-9M [11]

| AC PC9M ev.br.: 070 ENG PCE PL 0022 | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------------------|-------------|--------------------------|-------------|-------------|-----------|---------------------------|-------------|-------------|-----------|
| Np 2000rpm | STANJE OKOLINE | | OČITANJE IZ DIJAGRAMA | | | | OČITANO S INSTRUMENATA | | | |
| | TT [h] | OAT [°C] | QFE [mbar] | Tq [psi] | ITT [°C] | Ng [%] | Wf [lb/hr] | Tq [psi] | ITT [°C] | Ng [%] |
| 1374 | 2 | 29.57 | 56 | 705 | 96.2 | 538 | 56 | 679 | 93.4 | 525 |
| 1125 | 19 | 29.97 | 58 | 757 | 99 | 557 | 58 | 733 | 96 | 541 |
| 663 | 15 | 29.49 | 56 | 744 | 98.4 | 548 | 56 | 710 | 95.1 | 513 |
| 412 | 22 | 29.55 | 57 | 765 | 99.5 | 548 | 57 | 733 | 96.6 | 529 |
| 250 | 7 | 30.5 | 58 | 720 | 97 | 553 | 58 | 693 | 94.9 | 540 |

Na tablicama 4. i 5. prikazani su rezultati provjera Power Assurance Check na dva zrakoplova Pilatus PC-9M. [11] Rezultati su dobiveni provjerama provedenim u sklopu periodičkih pregleda tijekom perioda eksploatacije zrakoplova. Za atmosferske uvjete, navedena su očitavanja parametara iz dijagrama te s instrumenata za: brzinu vrtila kompresora, temperaturu između turbina, okretni moment te protok goriva.

Pomoću ovih očitavanja parametara motora te njihovom analizom lako se utvrđuje je li motor ispravan (ukoliko se parametri poklapaju ili su približno jednaki) ili postoji nekakav kvar koji je potrebno ispraviti (značajnija odstupanja u očitanjima).

6. ZAKLJUČAK

Kako bi se osigurala ispravnost i pouzdanost turboelisnog motora P&W PT6 na zrakoplovu Pilatus PC-9 potrebno ga je, propisanim i standardiziranim postupcima, redovito održavati. Održavanje zrakoplova uključuje preglede, popravke i preinake koje obavlja kvalificirano osoblje u, za to, predviđenom roku.

Motor je vrlo bitna komponenta zrakoplova koja je sastavljena od više sustava i dijelova te, kako bi se održala pouzdanost, potrebno ga je pravilno koristiti i poštovati radna ograničenja. Pomoću radnih parametara, odnosno, analizom parametara rada motora tijekom leta i njegovim kontinuiranim praćenjem, održavanje zrakoplova i njegove pogonske jedinice je uvelike olakšano. Osoblje odgovorno za održavanje zrakoplova uvidom u parametre rada motora može procijeniti i ispraviti određene nepravilnosti na motoru prije nego što prerastu u neočekivani trošak. Takav način održavanja pokazao se vrlo učinkovitim jer je smanjio predviđeno vrijeme održavanja zrakoplova i troškove, a povećao vrijeme zrakoplova u eksploataciji.

LITERATURA

- [1] A. Domitrović, *Održavanje i eksploatacija, Autorizirana predavanja*, Zagreb: Fakultet prometnih znanosti, 2018..
- [2] Preuzeto sa: <https://www.easa.europa.eu/regulations>.
- [3] Pilatus PC-9 - Aircraft manual, Stans, Switzerland, 1998..
- [4] »Aircraft compare,« Preuzeto sa: <https://www.aircraftcompare.com/aircraft/pilatus-pc-9-m/>. [Pristupljeno: kolovoz 2020.].
- [5] »Pilatus,« Preuzeto sa: <https://www.pilatus-aircraft.com/data/document/Pilatus-Aircraft-Ltd-PC-9-Factsheet.pdf>. [Pristupljeno: rujan 2020.].
- [6] *Konzultacije s tehničkim osobljem iz tehničke službe*, 93.Zrakoplovna baza "Pukovnik Mirko Vukušić"Zemunik, srpanj 2020..
- [7] »PT6 Training Manual,« Preuzeto sa: <http://www.mautone.eng.br/apostilas/propulsao1/PT6%20Training%20Manual.pdf>. [Pristupljeno: rujan 2020.].
- [8] Pratt & Whitney Canada PT-6A-62, siječanj 1999..
- [9] »Engine Trend Monitoring,« Preuzeto sa: https://www.latitudetech.com/solutions/engine-trend-monitoring/?gclid=Cj0KCQjw7sz6BRDYARIsAPHzrNLObRf-HNuv7mnTPecjw6Uk9XlSp6ATxSnQ4n8o0tx3Mv4GT7K_AGgaAmpkEALw_wcB. [Pristupljeno: rujan 2020.].
- [10] E. Bazijanac, *Tehnička eksploatacija i održavanje zrakoplova- Teoretske osnove*, Zagreb: Fakultet prometnih znanosti, 2007..
- [11] L. Eleršek, *Monitoring i analiza trenda tehničkih parametara mlaznih motora u eksploataciji, Magistarski rad*. [Art]. Fakultet prometnih znanosti, 2004..

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. Pilatus PC-9M Hrvatskog ratnog zrakoplovstva [4] | 8 |
| Slika 2. Izgled i dimenzije [5] | 9 |
| Slika 3. Motor PT6 [7] | 10 |
| Slika 4. Motorski instrumenti zrakoplova Pilatus PC-9 [6] | 16 |
| Slika 5. Primjer promjene odstupanja parametara motora [11] | 19 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1: Tehničke karakteristike [3] | 9 |
| Tablica 2: Eksploatacijske karakteristike zrakoplova Pilatus PC-9 [3] | 9 |
| Tablica 3: Osnovne karakteristike motora [8]..... | 11 |
| Tablica 4 :Rezultati provjera Power Assurance Check na motorima zrakoplova PC-9M [11] | 19 |
| Tablica 5: Rezultati provjera Power Assurance Check na motorima zrakoplova PC-9M [11] | 20 |



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj završni 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 završnog rada pod naslovom

**Održavanje turboelisknog motora PT 6
na temelju praćenja radnih parametara**

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

U Zagrebu, 9.9.2020.

Student/ica:

Karlo Broj
(potpis)