

Usporedba indikacije potiska zrakoplovnog mlaznog motora pomoću brzine vrtnje i omjera ukupnih tlakova

Rotim, Borna

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:119:794623>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

BORNA ROTIM

**USPOREDBA INDIKACIJE POTISKA
ZRAKOPLOVNOG MLAZNOG MOTORA POMOĆU
BRZINE VRTNJE I OMJERA UKUPNIH TLAKOVA**

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2024.

Zagreb, 9. rujna 2024.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Zrakoplovni pogonski sustavi II**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 7555

Pristupnik: **Borna Rotim (0135257483)**
Studij: **Aeronautika**
Smjer: **Pilot**
Usmjerenje: **Civilni pilot**

Zadatak: **Usporedba indikacije potiska zrakoplovnog mlaznog motora pomoću brzine vrtnje i omjera ukupnih tlakova**

Opis zadatka:

U uvodnom dijelu rada potrebno je opisati princip rada turbo-mlaznog motora i vrste motora. U nastavku je potrebno objasniti performanse mlaznih motora, s naglaskom na potisak motora. U glavnom dijelu rad potrebno je detaljno objasniti načine indikacije potiska na zrakoplovu, i to indikaciju potiska pomoću brzine vrtnje vratila motora te indikaciju potiska pomoću omjera ukupnih tlakova motora. U zaključnom dijelu rada potrebno je usporediti dva opisana načina indikacije potiska te dati pregled prednosti i nedostataka dva opisana načina.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

izv. prof. dr. sc. Anita Domitrović

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet Prometnih Znanosti

ZAVRŠNI RAD

USPOREDBA INDIKACIJE POTISKA ZRAKOPLOVNOG MLAZNOG MOTORA POMOĆU BRZINE VRTNJE I OMJERA UKUPNIH TLAKOVA

COMPARISON OF THRUST INDICATION OF AN AIRCRAFT JET ENGINE USING ROTATION SPEED AND ENGINE PRESSURE RATIO

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

Student: Borna Rotim

Zagreb, rujan 2024.

Sažetak

Ovim radom opisuju se osnovni principi rada turbo-mlaznog motora i njihova podjela. Također razmatra se i potisak mlaznog motora kao glavni faktor performansi mlaznog motora gdje su formulirani matematički izrazi za potisak. Posebna pozornost posvećuje se detaljnijem opisivanju načina indikacije potiska mlaznog motora pomoću dva primarna načina indikacije potiska, N1 brzine vrtnje niskotlačnog kompresora ili brzine vrtnje ventilatora kod mlaznih motora s visokim stupnjem optočnosti i pomoću omjera ukupnih tlakova motora (EPR), ispitujući njihova načela rada, prednosti i ograničenja.

Ključne riječi: Mlazni motor, performanse motora, potisak, indikacija potiska, N1, EPR

Summary

This thesis describes the basic principles of turbo-jet engine operation and their division. Jet engine thrust as a major factor in jet engine performance indication is being discussed where mathematical expressions for thrust are formulated. Particular attention is being put into describing the jet engine thrust indication methods in more detail using the two primary thrust indication methods, N1 low-pressure compressor speed or fan speed in high-bypass jet engines and using the engine pressure ratio (EPR), examining their working principles, advantages and limitations.

Keywords: Jet engine, engine performance, thrust, thrust indication, N1, EPR

SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Općenito o mlaznim motorima	2
2.1. Osnovna podjela mlaznih motora.....	2
2.2. Plinska turbina	2
2.3. Princip rada turbo-mlaznog motora.....	3
3. Performanse motora i indikacija potiska	5
3.1. Potisak mlaznog motora	5
3.2. Neto potisak mlaznog motora	7
3.3. Potisak optočnog mlaznog motora	7
3.4. Načini indikacije potiska mlaznog motora	9
4. Indikacija potiska pomoću N1	11
5. Indikacija potiska pomoću EPR.....	17
6. Usporedba indikacije potiska pomoću N1 i EPR.....	23
6.1. Prednosti i nedostaci N1 metode indikacije potiska.....	23
6.2. Prednosti i nedostaci EPR metode indikacije potiska	24
7. Zaključak	26
Literatura.....	27
Popis slika	28
Popis tablica	29

1. Uvod

Sa sve većim razvojem mlaznih motora u sve složenijem svijetu zrakoplovstva, potreba za točnosti, preciznosti i faktorom sigurnosti kontinuirano je rasla, posljedično i potreba za preciznom indikacijom potiska mlaznog motora. Točna indikacija potiska jedna je od najvažnijih faktora za osiguravanje sigurnog i učinkovitog rada mlaznih motora, samim time i sigurnog izvođenja letnih operacija u svim režimima leta. Piloti i inženjeri održavanja zrakoplova oslanjaju se na precizna mjerenja potiska za praćenje i održavanje performansi motora, upravljanje postavkama snage i optimiziranje operacija leta. Među različitim metodama koje se koriste za označavanje potiska dvovratilnih turboventilatorskih motora, brzina vrtnje niskotlačne turbine (N1) i omjer tlakova motora (*Engine pressure ratio*, EPR) ističu se kao dva ključna pokazatelja performansi motora. Svaka metoda nudi jedinstveni uvid u performanse motora, odražavajući različite aspekte rada motora.

Cilj ovog završnog rada je provesti usporedbu N1 i EPR metode indikacije potiska, ispitujući teorijske osnove, principe rada te prednosti i mane u implementaciji. Procjenom ovih metoda ovaj rad nastoji pružiti uvid u optimalnu upotrebu indikatora potiska u različitim zrakoplovnim kontekstima, pridonoseći poboljšanim performansama motora i sigurnosnim standardima.

Rad je podijeljen u 7 poglavlja. Nakon uvoda, u drugom poglavlju navode se vrste mlaznih motora koji se koriste u zrakoplovstvu. Zatim se opisuje plinska turbina koja čini temelj svakog mlaznog motora i termodinamički proces svake plinske turbine, kao i kratki opis principa rada turbo-mlaznog motora.

U trećem poglavlju opisuje se potisak kao glavni i primarni faktor performansi mlaznog motora. Također je u ovom poglavlju matematički opisan potisak mlaznog motora, neto potisak mlaznog motora i potisak optočnog mlaznog motora. Kraj trećeg poglavlja rezerviran je za načine indikacije potiska, koji je kratki uvod u iduća poglavlja.

U četvrtom poglavlju detaljno se opisuje indikacija potiska pomoću N1 vrtnje niskotlačnog kompresora i turbine te brzinom vrtnje ventilatora kod turboventilatorskih mlaznih motora. U petom poglavlju se detaljno opisuje indikacija potiska pomoću EPR odnosno omjera ukupnih tlakova motora.

U šestom poglavlju pozornost se posvećuje usporedbi indikacije potiska već detaljno opisanih u prethodna dva poglavlja, razmatrajući prednosti i mane jedne i druge metode.

U sedmom poglavlju je iznesen zaključak, uz popis korištene literature na kraju rada te popis slika i tablica korištenih u ovome radu.

2. Općenito o mlaznim motorima

Mlazni motori su reaktivni motori, koji stvaraju potisak na principu 3. Newtonovog zakona akcije i reakcije, ispuštanjem mlaza ispušnih plinova pri velikim brzinama kroz mlaznik motora u atmosferu.

Osnovna podjela mlaznih motora se može svrstati na atmosferske mlazne motore i raketne mlazne motore [1].

2.1. Osnovna podjela mlaznih motora

Atmosferski mlazni motori se mogu podijeliti na sljedeće skupine [1]:

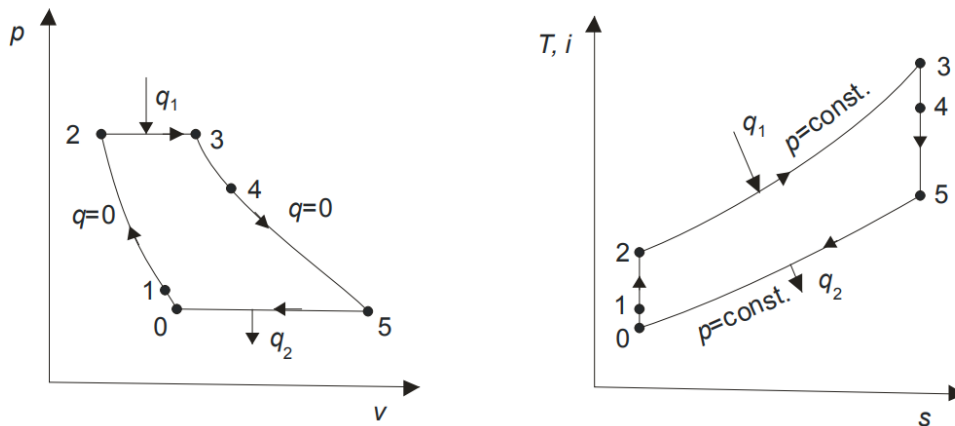
- Kompresorski: turbo-mlazni motori (*Turbojet*) i obtočni ili turbo-ventilatorski (*Turbofan*)
- Nabojno-mlazni motori: mlazni motori (*Ramjet*, *Scramjet*)
- Kombinirani: turbo-elisni i vratilno-mlazni motori (*Turboprop*, *Turboshaft*)

2.2. Plinska turbina

Plinskom turbinom smatra se svaki stroj koji pretvara korisnu energiju vrućih plinova u koristan mehanički rad za pogon vratila turbine. Svaki mlazni motor u osnovi je plinska turbina koja korisnu energiju ispušnih plinova predaje turbinskom sklopu za pogon kompresora i ostalih agregata. Jezgra svakog mlaznog motora je sačinjena od plinske turbine (kompresor – komora izgaranja – turbina) [1].

Proces u plinskoj turbini, odnosno, u svakom mlaznom motoru opisan je *Bryton*-ovim ciklusom (slika 1). Analiza idealnoga *Bryton*-ovog ciklusa zasniva se na sljedećim pretpostavkama: [1]

- Radna tvar je idealni plin čiji se sastav ne mijenja tijekom procesa te ne postoje gubitci mase;
- Ne postoje gubitci topline, pad tlaka uslijed prigušivanja i ne postoji trenje, što znači da su procesi sabijanja i širenja izentropski;
- Ekspanzija mlaza se završava u mlazniku do atmosferskog tlaka, a radna tvar se uvjetno vraća u prvobitno stanje putem predaje topline okolini pri konstantnom tlaku;
- Sva toplinska energija sadržana u gorivu se predaje radnoj tvari bez gubitka čime se zamjenjuje proces izgaranja.



Slika 1: Idealni *Bryton*-ov ciklus mlaznih motora u p-V i T, i-s dijagramu [1]

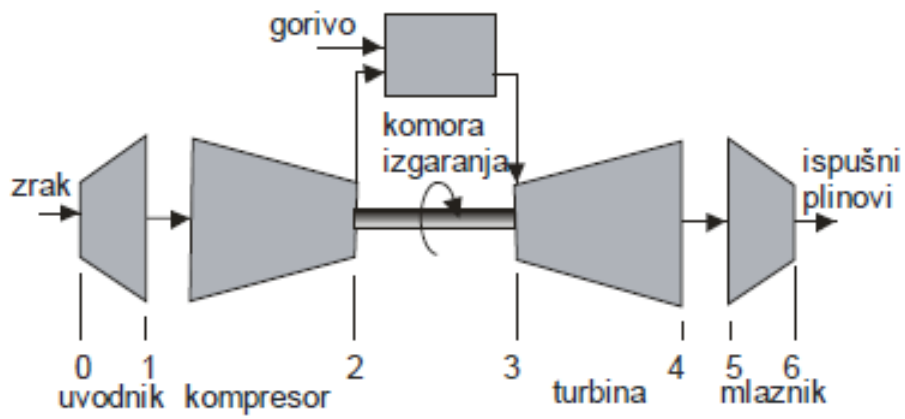
Opis ciklusa [1]:

- 0-1 radna tvar ulazi u uvodnik motora te se blago komprimira i zagrijava;
- 1-2 radna tvar se dalje stlačuje u kompresu te dolazi do znatnog povećanja tlaka i temperature;
- 2-3 dovođenje toplinske energije ubrizgavanjem te izgaranjem goriva u komori izgaranja s radnom tvari;
- 3-4 ekspanzija radne tvari prolaskom kroz turbinu;
- 4-5 nastavak ekspanzije radne tvari, tijekom prolaska kroz ispušnu cijev, u mlazniku;
- 5-0 predaja toplinske energije okolini, odnosno hlađenje produkata izgaranja te time svođenjem procesa na prvobitno stanje

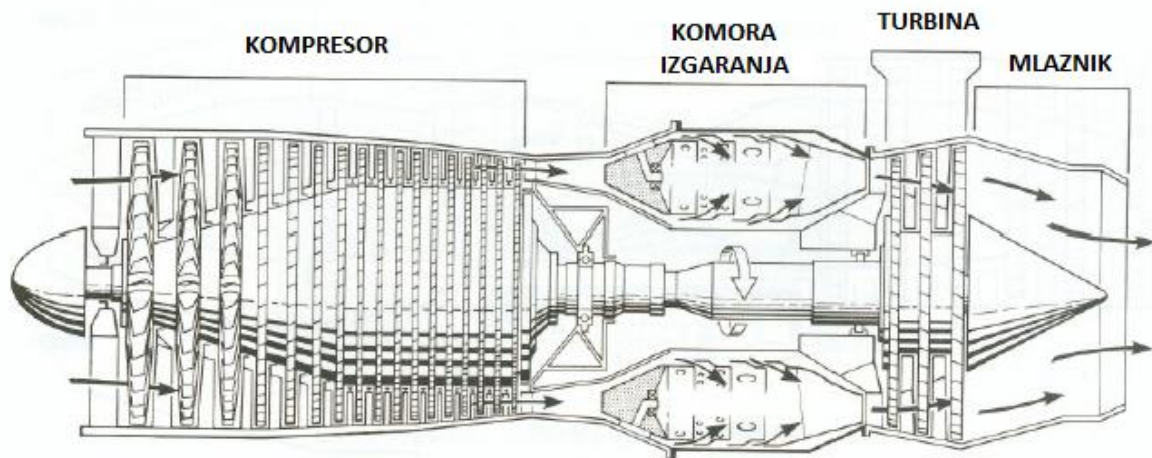
2.3. Princip rada turbo-mlaznog motora

Glavni dijelovi mlaznog motora su: uvodnik, kompresor, komora izgaranja, turbina i mlaznik. Zrak ulazi u uvodnik koji ima oblik difuzora zbog čega dolazi do malog smanjenja brzine i povećanja statičkog tlaka. U kompresoru se tlak značajno povećava zbog čega dolazi i do povećanja temperature. Prije ulaska u komoru izgaranja zrak prolazi kroz difuzor gdje mu se dodatno smanji brzina kako bi se osiguralo stabilno izgaranje. U komoru izgaranja se ubrizgava gorivo koje se raspršuje i izgara. Tu dolazi do povećanja radne temperature dok tlak neznatno padne zbog otpora strujanja. Jedan dio oslobođene toplinske energije se iskoristi na lopaticama turbine gdje se pretvara u mehanički rad. Taj rad se koristi za pokretanje kompresora. Produkti izgaranja poslije turbine prolaze kroz mlaznik gdje im se povećava brzina, a produkti izgaranja ekspanziraju do približno tlaka okoline. U mlazniku se preostali dio potencijalne energije produkata izgaranja pretvara u kinetičku energiju.[1]

Tipični prikaz mlaznog motora prikazan je na slici 2 i na slici 3.



Slika 2: Pojednostavljeni prikaz mlaznog motora [1]



Slika 3: Poprečni presjek mlaznog motora [2]

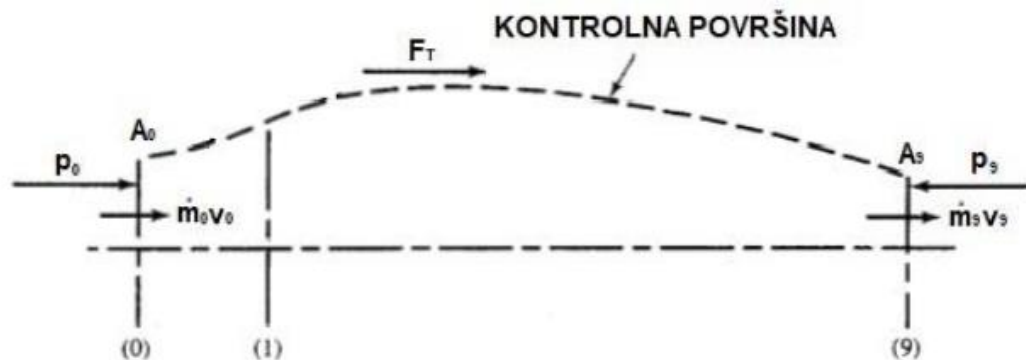
3. Performanse motora i indikacija potiska

3.1. Potisak mlaznog motora

Potisak je sila odgovorna za pogon zrakoplova u različitim režimima leta. Nastaje kao rezultat promjene količine kretanja radne tvari koja prolazi kroz motor: na ulazu u motor mala brzina, a na izlazu povećana brzina. Ta promjena količine kretanja je proizvedena na račun oslobođene energije uslijed izgaranja goriva.[1]

Treći *Newton*-ov zakon (zakon akcije i reakcije) koji glasi: „Za svaku akciju postoji jednaka i suprotna reakcija.“ Akcija mlaznog motora u ovom slučaju je ubrzanje i ispuh mase produkata izgaranja kroz motor, jednaka i obrnuta reakcija je sila potiska.[2]

Radi lakše analize toka zraka kroz mlazni motor, potrebno je upoznati se s pojmom kontrolnog volumena. Da bi se pronašla sila potiska mlaznog motora, postavlja se kontrolna površina koja olakšava proračun, prikazana na slici 4. [3]



Slika 4: Kontrolna površina mlaznog motora [3]

Djelovanje vanjskih sila na kontrolnu površinu može se zapisati kao promjena impulsnog protoka:[1]

$$\vec{F} = \vec{I}_9 - \vec{I}_0 \quad (1)$$

gdje je:

- \vec{F} [N] – sila u osloncu
- \vec{I}_9 [kgm/s²] – impulsni protok na izlazu iz kontrolne površine

- $\vec{I}_0 [kgm/s^2]$ – impulsni protok na ulazu u kontrolnu površinu

Impulsni protok jednak je umnošku masenog protoka zraka $\dot{m} [kg/s]$ i brzine toka zraka $v [m/s]$, tako da su na ulazu (I_0) i izlazu (I_9) impulsni protoci jednaki:[1]

$$I_0 = \dot{m}_0 * v_0 \quad (2)$$

$$I_9 = \dot{m}_9 * v_9 \quad (3)$$

Sile koje djeluju na kontrolnu površinu su:

$$F = F_T + p_0 * A_0 - (A_0 - A_9) * p_0 - A_9 * p_9 \quad (4)$$

gdje je:

- $F_T [N]$ - sila potiska
- $p_0 [Pa]$ – tlak slobodne struje zraka
- $A_0 [m^2]$ – površina presjeka kontrolne površine na ulazu
- $p_9 [Pa]$ – tlak ispušnih plinova
- $A_9 [m^2]$ – površina presjeka kontrolne površine na izlazu

odnosno:

$$F = F_T + A_9 * (p_0 - p_9) \quad (5)$$

Budući da je ukupni utjecaj vanjskih sila jednak promjeni impulsnog protoka, vrijedi slijedeći izraz:

$$F_T = \dot{m}_0 * (v_9 - v_0) + A_9 * (p_9 - p_0) \quad (6)$$

Uzimajući u obzir ekspanziju ispušnih plinova do razine atmosferskog tlaka u okolini motora ($p_9 = p_0$), može se pisati pojednostavljeni izraz za potisak:

$$F_T = \dot{m}_0 (v_9 - v_0) \quad (7)$$

gdje je:

- $F_T [N]$ - sila potiska
- $\dot{m}_0 [kg/s]$ – maseni protok zraka na ulazu
- $v_9 [m/s]$ – brzina strujanja zraka na izlazu
- $v_0 [m/s]$ – brzina strujanja zraka na ulazu

3.2. Neto potisak mlaznog motora

Neki zrakoplovni mlazni motori mogu se koristiti na više tipova zrakoplova, zbog čega ukupni proizvedeni potisak ovisi i o motoru i o gondoli u koju je ugrađen. Rezultat toga je upotreba izraza statički potisak (eng. *Static Thrust, Uninstalled Engine Thrust*) i neto potisak (eng. *Net Thrust, Installed Engine Thrust*). Neto potisak je potisak koji proizvede motor ugrađen u gondolu, odnosno sila reakcije koja se javlja u osloncu motora.[3]

Izraz za potisak može se izraziti kao:

$$F_T = \dot{m}_0 * v_9 - \dot{m}_0 * v_0 \quad (8)$$

Izraz za neto potisak može se izraziti kao:

$$F_T = F_S - F_D \quad (9)$$

Izraz $F_S [N]$ predstavlja statički potisak koji se dobije pri brzini $v_0 = 0$, odnosno kada ne postoji kretanje zrakoplova. $F_D [N]$ predstavlja otpor ugrađenog motora koji se javlja zbog pojave viskoznih sila tijekom strujanja i pritiska koji djeluje na oplatu motora (eng. *Ram drag*).[3]

3.3. Potisak optočnog mlaznog motora

Razvojem zrakoplovstva kroz vrijeme došlo se do zaključka da je efikasnije ubrzavati veću količinu mase manjom brzinom, nego manju količinu mase većom brzinom da bi se postigao određeni potisak. Zbog toga su danas obični, odnosno jednostrujni turbomlazni motori rijetki. Jedan od mogućnosti povećanja efikasnosti mlaznih motora bilo je uvođenje obtočnih ili ventilatorskih mlaznih motora (eng. *Turbofan Jet Engines*).[1]

Jedan dio zraka potiskuje se ventilatorom i taj dio zraka ne prolazi kroz komoru izgaranja. To je tzv. “hladna” struja zraka. Druga struja zraka prolazi kroz komoru izgaranja i ta količina se naziva “topla” struja zraka. Omjer hladne i tople struje zraka naziva se stupanj obtočnosti BPR (eng. *Bypass ratio*) [1], koji se može prikazati izrazom:

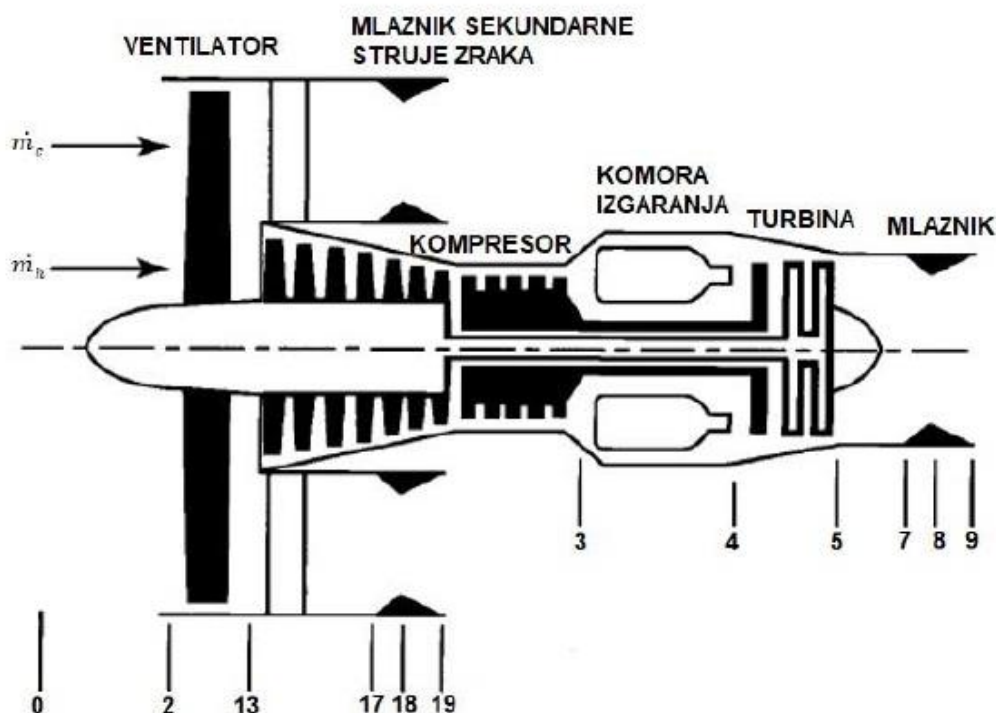
$$BPR = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_h} \quad (10)$$

gdje je:

- $\dot{m}_c [kg/s]$ – maseni protok hladne struje zraka
- $\dot{m}_h [kg/s]$ – maseni protok tople struje zraka

Za proračun potiska optočnog mlaznog motora objasniti će se standardno označavanje dijelova presjeka optočnog mlaznog motora. Prikazano na slici 5. vidi se shema presjeka klasičnog optočnog mlaznog motora s karakterističnim dijelovima i pripadajućim oznakama:[3]

- 0 – ulazak neporemećene struje zraka
- 2 – pozicija ulaska struje zraka u ventilator
- 3 – zadnji stupanj visokotlačnog kompresora
- 4 – izlaz plinova iz komore izgaranja u turbinu
- 5 – zadnji stupanj niskotlačne turbine
- 7, 8 i 9 – početak, srednji dio i kraj mlaznika primarne struje zraka (topla struja)
- 13 – pozicija iza ventilatora
- 17, 18 i 19 – početak, srednji dio i kraj mlaznika sekundarne struje zraka (hladna struja)



Slika 5: Karakterističan presjek optočnog mlaznog motora[3]

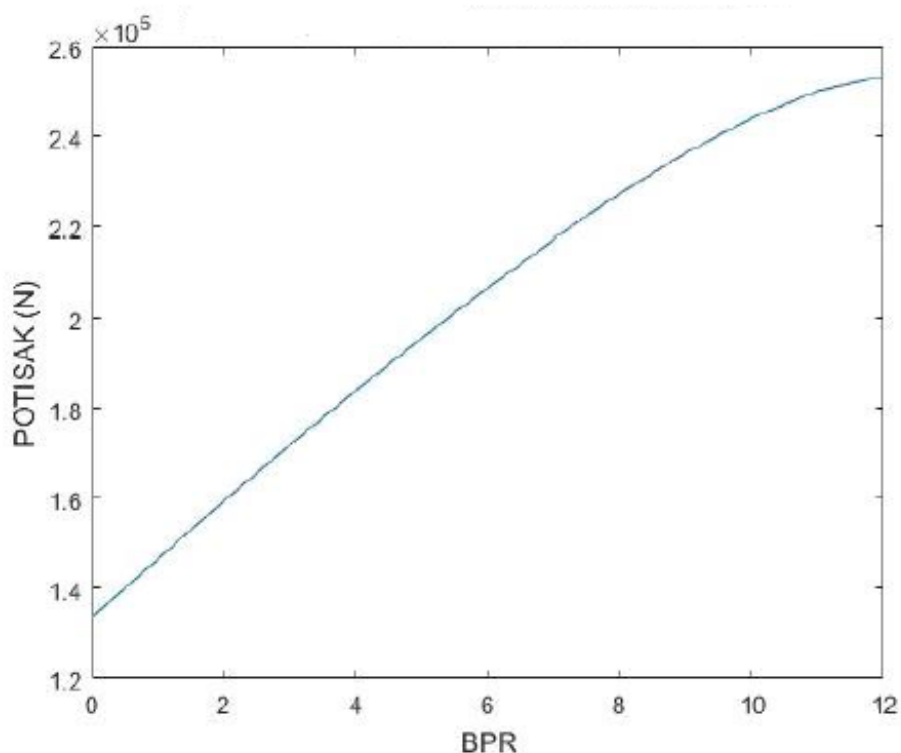
Formula za izračun potiska optočnog mlaznog motora glasi:

$$F_T = \dot{m}_c * v_{19} + \dot{m}_h * v_9 - v_0 * (\dot{m}_c + \dot{m}_h) + (p_{19} - p_0) * A_2 + (p_9 - p_0) * A_9 \quad (11)$$

Pojednostavljeni izraz glasi:

$$F_T = \dot{m}_h * (v_9 - v_0) + \dot{m}_c * (v_{19} - v_0) \quad (12)$$

Ukupni potisak jednak je zbroju proizvedenog potiska od strane jezgre motora i potiska proizvedenog od strane ventilatora koji čini 80% ukupnog potiska optočnog mlaznog motora. Time se može zaključiti da je potisak proporcionalan veličinom promjera ventilatora odnosno, da povećanjem stupnja optočnosti raste i potisak, što je prikazano na slici 6.



Slika 6: Utjecaj povećanja stupnja optočnosti na potisak [3]

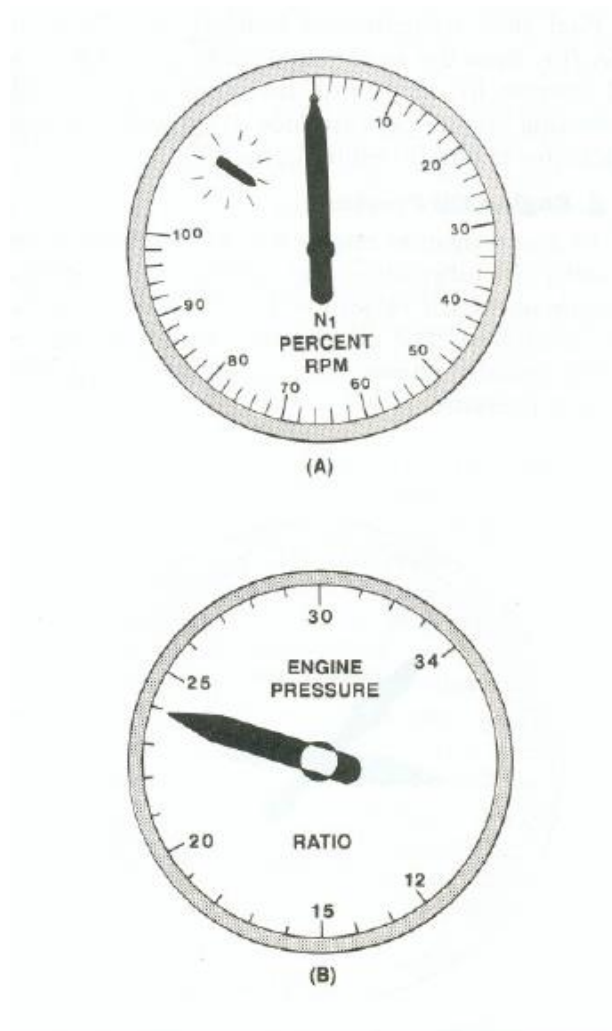
3.4. Načini indikacije potiska mlaznog motora

Mlazni motor, iako ima relativno jednostavan princip rada, predstavlja složen sustav koji zahtijeva odgovarajući nadzor kako bi se osigurala sigurnost leta. U tu su svrhu pilotu dostupni odgovarajući instrumenti i kontrole. Tijekom godina rasporeda kokpita s tročlanom posadom (koji je završio osamdesetih godina), nadziranje protoka goriva i sustava parametara motora bio je zadatak "letnog" inženjera. Zbog zahtjeva i potražnje za smanjenjem radnog opterećenja pilota i pojednostavljenja sustava, taj zadatak je sada ili automatiziran ili integriran u koncept kokpita s dvočlanom posadom.[4]

Potisak mlaznog motora se mjeri na ispitnom stolu, gdje se na dinamometru može direktno mjeriti potisak. U uvjetima rada mlaznog motora na zrakoplovu, indikacija potiska se izvodi na dva načina:[1]

- Na temelju brzine vrtnje niskotlačnog kompresora i turbine, te kod optočno mlaznih motora pomoću brzine vrtnje ventilatora N1 u %RPM
- Pomoću omjera ispušnog tlaka iz turbine i tlaka kod uvodnika (eng. *Engine Pressure Ratio, EPR*).

Ovisno o vrsti zrakoplova i motora, rad mlaznog motora obično se nadzire promatranjem instrumenata motora u kokpitu. Potisak motora indicira se pomoću indikatora omjera tlaka EPR ili indikatora brzine vrtnje ventilatora N1, ovisno o ugradnji. U nekim se slučajevima također mogu koristiti obje vrste indikacija. Slika 7. prikazuje prikaznike indikacije potiska smještenih u kokpitu zrakoplova.[5]



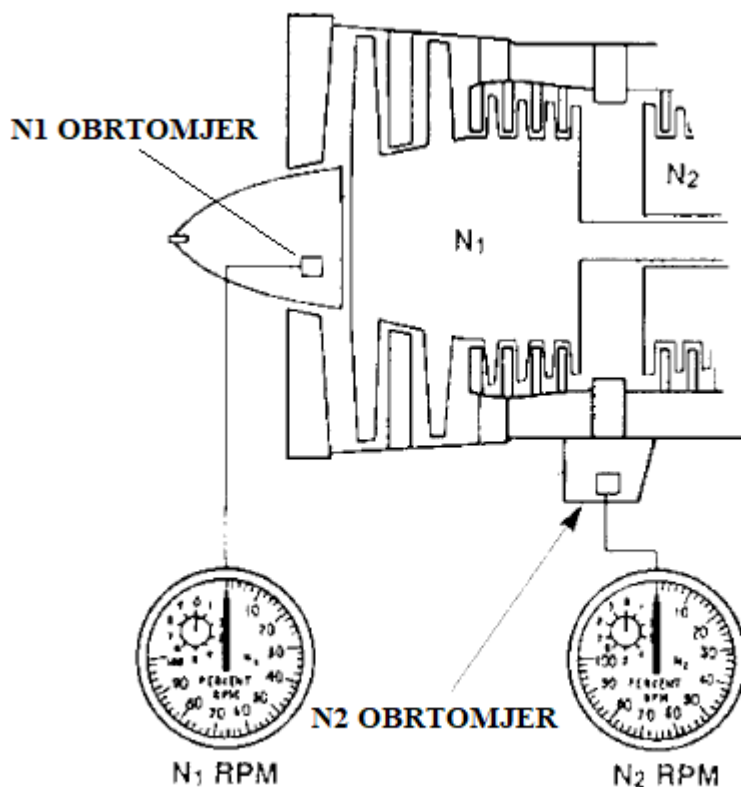
Slika 7: Prikaznik N1 indikacije potiska (A) i prikaznik EPR indikacije potiska (B)[5]

4. Indikacija potiska pomoću N1

Potreban sustav za mjerenje N1 indikacije potiska je tahometar ili obrtomjer. Njegova indikacija omogućuje pilotima praćenje rada motora i praćenje performansi motora. Obrtomjeri za turbomlazne motore pokazuju brzinu motora u RPM puta 100 - pokazujući brzinu vrtnje kompresora i turbine u postocima broja okretaja u minuti.[5]

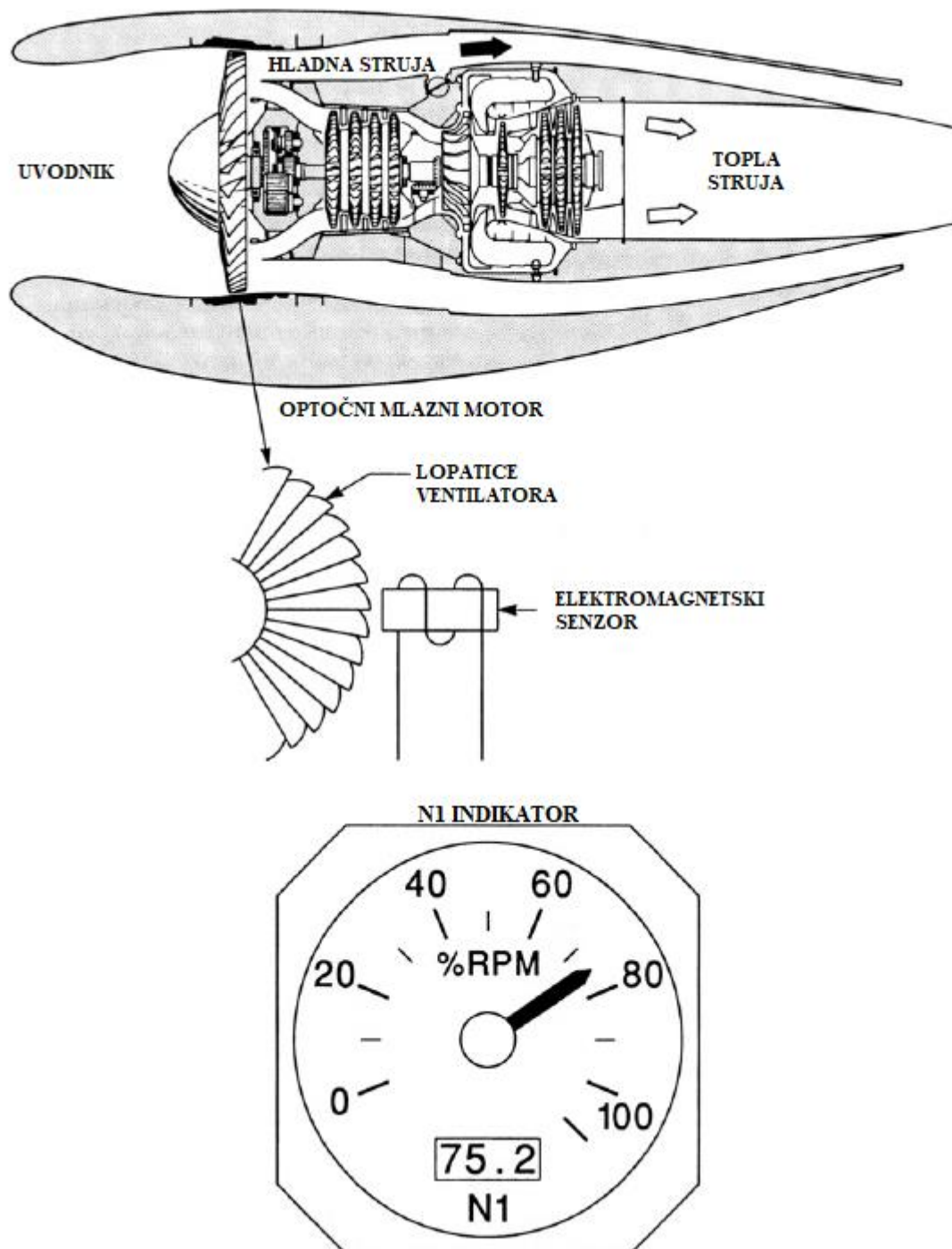
Većina tipova zrakoplova ima barem jedan obrtomjer koji pokazuje brzinu vrtnje motora. Ovo vrijedi i za motore s reduktorom; obrtomjer pokazuje broj okretaja koljenastog vratila kod klipnih motora a ne broj okretaja propelera. Mlazni motori koriste obrtomjere koji daju očitavanja u postocima okretaja u minuti (%RPM), a ne stvarnih okretaja u minuti.[5]

Mlazni motori s više vratila obično imaju dva vratila, a postoje i oni koji imaju tri vratila. Takvi motori imati će obrtomjer za svako vratilo. U slučajevima turbomlaznih i turboventilatorskih motora, oni se nazivaju N1 i N2 obrtomjeri. N1 obrtomjer mjeri brzinu vrtnje niskotlačnog kompresora, a N2 visokotlačnog kompresora kod dvovratilnih motora kao što je prikazano na slici 8.[5]



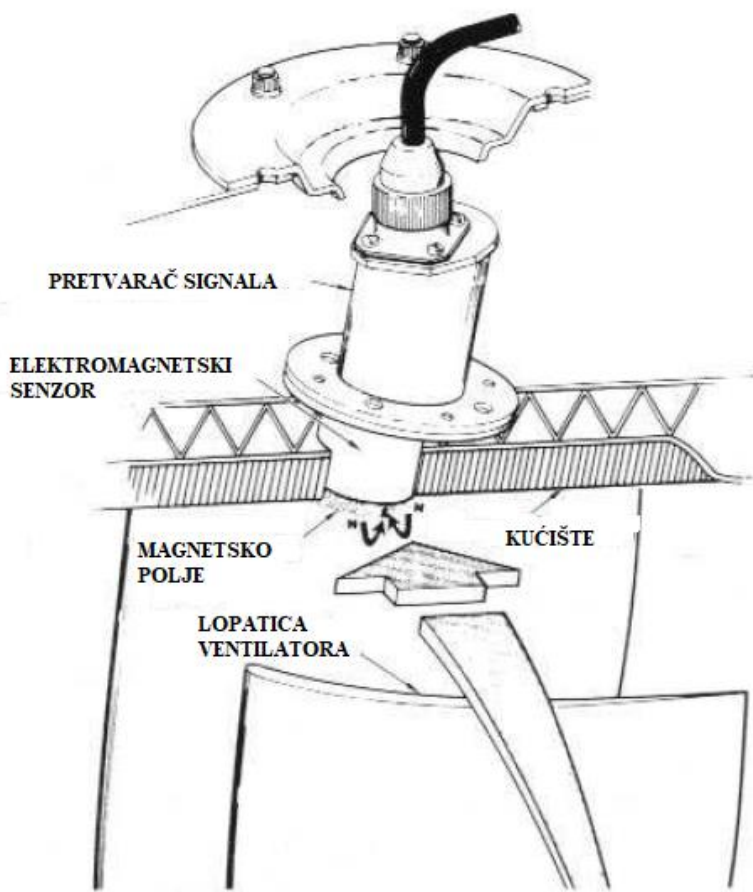
Slika 8: Pozicija N1 i N2 obrtomjera [5]

Noviji sustavi za mjerenje broja okretaja motora imaju senzor postavljen na kućište ventilatora, koji postavlja magnet uz rotaciju lopatice ventilatora kao što je prikazano na slici 9.[5]



Slika 9: Pozicija elektroničkog obrtomjera koji mjeri N1 brzinu vrtnje ventilatora optoćnog mlaznog motora [5]

Na ovakvoj instalaciji, kao što je prikazano na slici 10., obrtomjer funkcioniра na način da rotacijom ventilatora, vrh ventilatorskih lopatica probija kroz magnetsko polje glave senzora stvarajući struju. Senzor stvara signal svaki put kada se lopatica ventilatora probije kroz magnetno polje. Jedinica pojačivača signala pojačava signal koji se zatim prikazuje na pokazivaču u postotku broja obrtaja. Ventilator ima direktnu povezanost s potiskom gdje je preciznost mjerenja brzine vrtnje vrlo precizna, samim time i vrlo pouzdana te jednostavna za korištenje i održavanje. Zbog tih razloga proizvođač je odabrao metodu N1 kao primarnu indikaciju potiska. [5]. Proizvođači kao što su G.E. (*General Electric*) i CFMI (*CFM International*) preferiraju N1 kao svoju primarnu metodu indikacije potiska.[6]

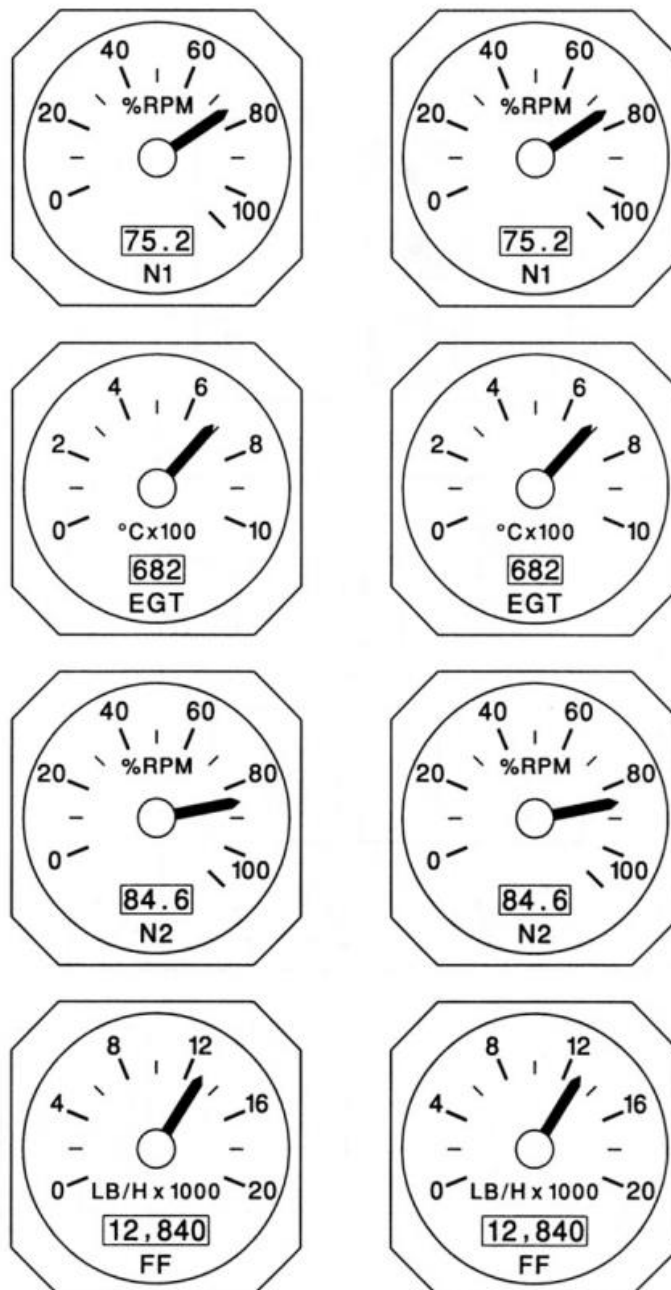


Slika 10: Princip rada električnog N1 obrtomjera [6]

Indikacija potiska pomoću brzine vrtnje ventilatora sve više ulazi u opću upotrebu s napretkom razvoja obrtomjera temeljenih na elektroničkim računalima i elektroničkim zaslonima. U većini svih modernih zrakoplova danas, instrumenti (ili elektronički zasloni) koji pokazuju izvedbu potiska motora montirani su na glavnu ploču s instrumentima kako bi ih pilot mogao lako vidjeti. Ovi instrumenti prenose vitalne informacije motora pilotu kao što su brzina vrtnje visokotlačnih (N2) i niskotlačnih (N1) turbina, omjer tlaka motora (EPR) i temperaturu ispušnih plinova EGT (eng. *Exhaust gas temperature*) te potrošnju goriva koje su bitne za

motrenje performansi motora i motrenje potencijalnih prekoračenja ograničenja samog motora.[6]

Slika 11. prikazuje tipični raspored prikaznika motorskih parametara u kokpitu zrakoplova proizvođača koji je odabrao N1 metodu indikacije potiska kao primarnu metodu. To se obično prepoznaje tako što je primarna indikacija potiska na vrhu rasporeda motorskih instrumenata.

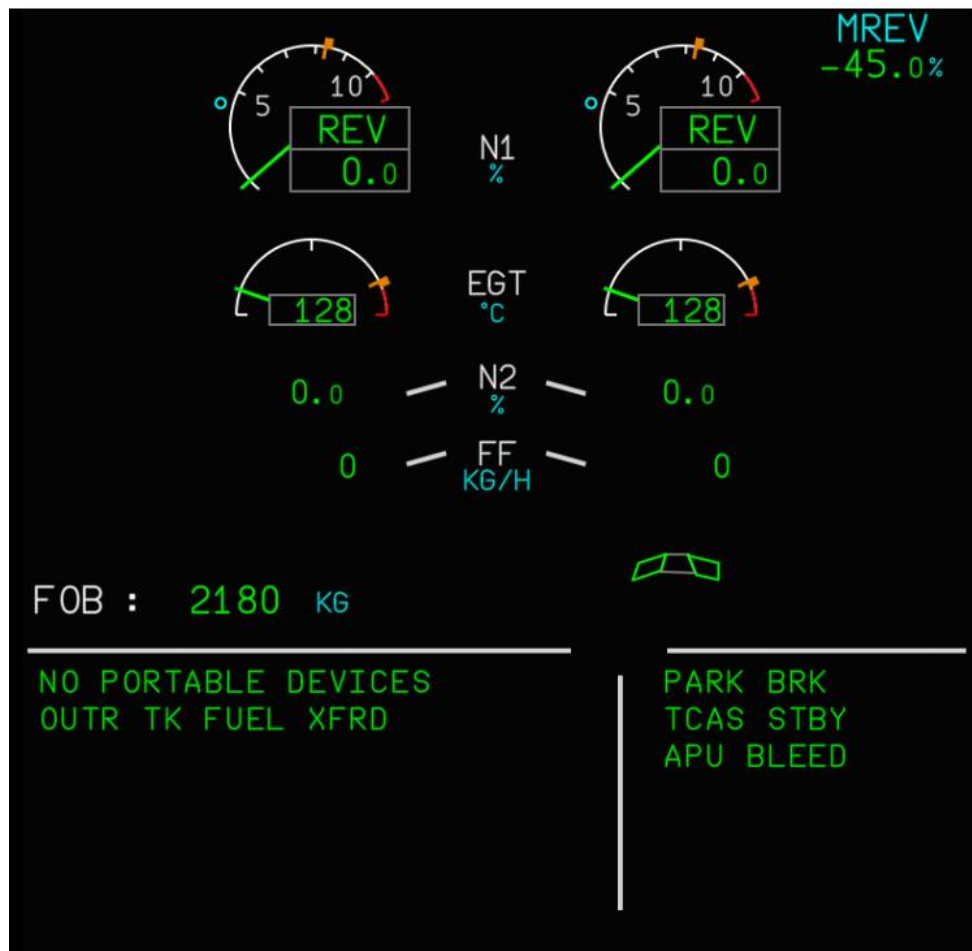


Slika 11: Raspored instrumenata pogonske jedinice za mlazni avion s G.E. motorima i N1 indikacijom na vrhu [5]

Moderni elektronički sustavi prikaza parametara motora kao što je ECAM (eng. *Electronic Centralized Aircraft Monitoring*) koji je integrirani elektronički sustav karakterističan za zrakoplove serije Airbus, namijenjen je poglavito za nadzor stanja primarnih sustava performansi zrakoplova. Iako prve serije ECAM-a nisu predviđale mogućnost prikaza motorskih parametara, nego se to radilo pomoću klasičnih analognih instrumenata, novije koncepcije omogućuju i njihov prikaz.[7]

Na zrakoplovima serije Airbus ECAM sustav je prezentiran na dva zaslona, uglavnom su ti zasloni pozicionirani jedan iznad drugoga. Gornji zaslon EWD (eng. *Engine and Warning Display*) daje statusnu informaciju o motorskim parametrima, parametrima napajanja gorivom, FOB (eng. *Fuel On Board*), stanje kontrolnih površina, upozorenja te korektivne procedure u formatu *check list*. Donji zaslon zvan SSD (eng. *System/Status Display*) daje slikovni prikaz statusa aktualnog sustava.[7]

Slika 12 prikazuje raspored motorskih instrumenata u stanju *Idle* na gornjem zaslonu ECAM u kokpitu zrakoplova Airbus.



Slika 12: Primjer tipičnog prikaza ECAM sustava zrakoplova Airbus [8]

CFM 56-5B4 - TAKEOFF M = .0

CFM56-5B4	N1 CORRECTIONS FOR AIR BLEED						OAT < CORNER POINT	OAT ≥ CORNER POINT					
	TAKEOFF N1						-700	-700					
	NO AIR BLEED												
	MACH=.000												
AIR CONDITIONING ON						0.000	-1.600						
ENGINE ANTI-ICE ON						0.000	-2.400						
ENGINE ANTI-ICE AND WING ANTI-ICE ON						0.000	-2.400						
OAT (°C)	PRESSURE ALTITUDE (FT)												
	-2000.	-1000.	0.	1000.	2000.	3000.	4000.	5000.	6000.	7000.			
-54.0	76.2	77.2	78.2	79.2	80.3	82.3	84.0	85.8	86.7	87.6			
-50.0	76.9	77.9	78.9	79.9	81.0	83.0	84.7	86.5	87.5	88.3			
-46.0	77.5	78.6	79.6	80.6	81.7	83.7	85.4	87.3	88.2	89.0			
-42.0	78.2	79.2	80.2	81.3	82.4	84.4	86.1	88.0	88.9	89.8			
-38.0	78.8	79.9	80.9	82.0	83.0	85.1	86.8	88.7	89.6	90.5			
-34.0	79.5	80.5	81.5	82.6	83.7	85.7	87.5	89.4	90.3	91.2			
-30.0	80.1	81.2	82.2	83.3	84.3	86.4	88.2	90.1	91.0	91.9			
-26.0	80.7	81.8	82.8	83.9	85.0	87.1	88.8	90.7	91.7	92.5			
-22.0	81.4	82.4	83.5	84.6	85.6	87.7	89.5	91.4	92.4	93.2			
-18.0	82.0	83.1	84.1	85.2	86.3	88.4	90.2	92.1	93.1	93.9			
-14.0	82.6	83.7	84.8	85.9	87.0	89.1	90.9	92.8	93.8	94.6			
-10.0	83.2	84.3	85.4	86.5	87.6	89.7	91.5	93.4	94.4	95.3			
-6.0	83.8	84.9	86.0	87.1	88.2	90.3	92.2	94.1	95.1	95.9			
-2.0	84.4	85.5	86.6	87.7	88.8	90.9	92.8	94.7	95.7	96.6			
2.0	85.0	86.1	87.2	88.3	89.4	91.6	93.4	95.4	96.4	97.2			
6.0	85.6	86.7	87.8	88.9	90.0	92.2	94.1	96.0	97.0	97.9			
10.0	86.2	87.3	88.4	89.5	90.7	92.8	94.7	96.7	97.7	98.5			
14.0	86.8	87.9	89.0	90.2	91.3	93.5	95.3	97.3	98.3	99.2			
18.0	87.4	88.5	89.6	90.8	91.9	94.1	95.9	97.9	98.9	99.8			
22.0	88.0	89.1	90.2	91.3	92.5	94.7	96.6	98.6	99.3	99.4			
26.0	88.5	89.7	90.7	91.9	93.1	95.3	97.2	98.3	98.5	98.5			
30.0	89.1	90.2	91.3	92.5	93.6	95.9	97.4	97.6	97.7	97.6			
34.0	89.7	90.8	91.9	93.1	94.2	96.5	96.8	97.0	97.1	97.1			
38.0	90.2	91.4	92.5	93.7	94.8	96.1	96.3	96.4	96.6	96.7			
42.0	90.8	91.9	93.1	94.2	94.9	95.6	95.7	95.8	96.0				
46.0	91.4	92.5	93.2	93.9	94.5	OAT < CORNER POINT							
50.0	91.5	92.2	92.9	93.6	94.1					OAT ≥ CORNER POINT			
54.0	91.2	92.0	92.7										

Slika 13: Prikaz vrijednosti potiska N1 indikacije [%RPM] za A320 CFM56-5B4 za režim polijetanja [10]

Slika 13 prikazuje tablicu vrijednosti potiska N1 indikacije u %RPM za zrakoplov A320 i model motora CFM56-5B4 za režim polijetanja u odnosu na vanjsku temperaturu OAT (eng. *Outside Air Temperature*) i na visinu po tlaku na kojoj zrakoplov polijeće.

5. Indikacija potiska pomoću EPR

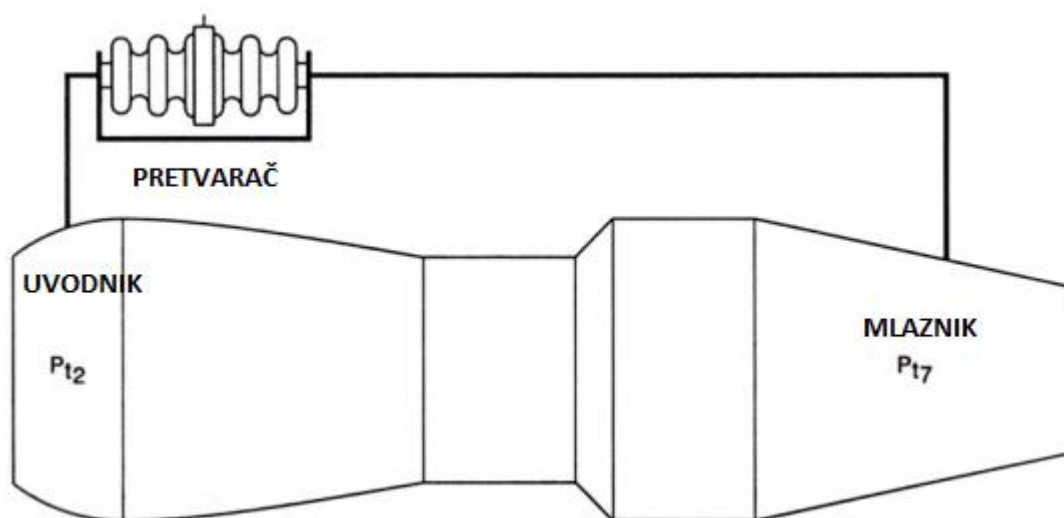
EPR se može definirati kao omjer dvaju tlakova motora: ukupnog tlaka na izlazu iz turbine i ukupnog tlaka na ulazu u kompresor. Ovi tlakovi se nazivaju ukupnim tlakovima jer sonde pozicionirane na ulazu i izlazu motora mjere statički i dinamički tlak. Samim time sonde funkcioniraju kao *pitot* cijevi budući da mjere ukupni tlak struje zraka. Svaki proizvođač koristi nešto drugačiji sustav numeriranja stanica mjerenja tih tlakova motora. Na primjer, Pratt & Whitney motori koriste poziciju 2 (p_{t2}) i poziciju 7 (p_{t7}) za identifikaciju mjernih točaka omjera tlaka motora kao što se može vidjeti na slici 14.[9]

Formula za izračun glasi:

$$EPR = \frac{p_{t7}}{p_{t2}}$$

gdje je:

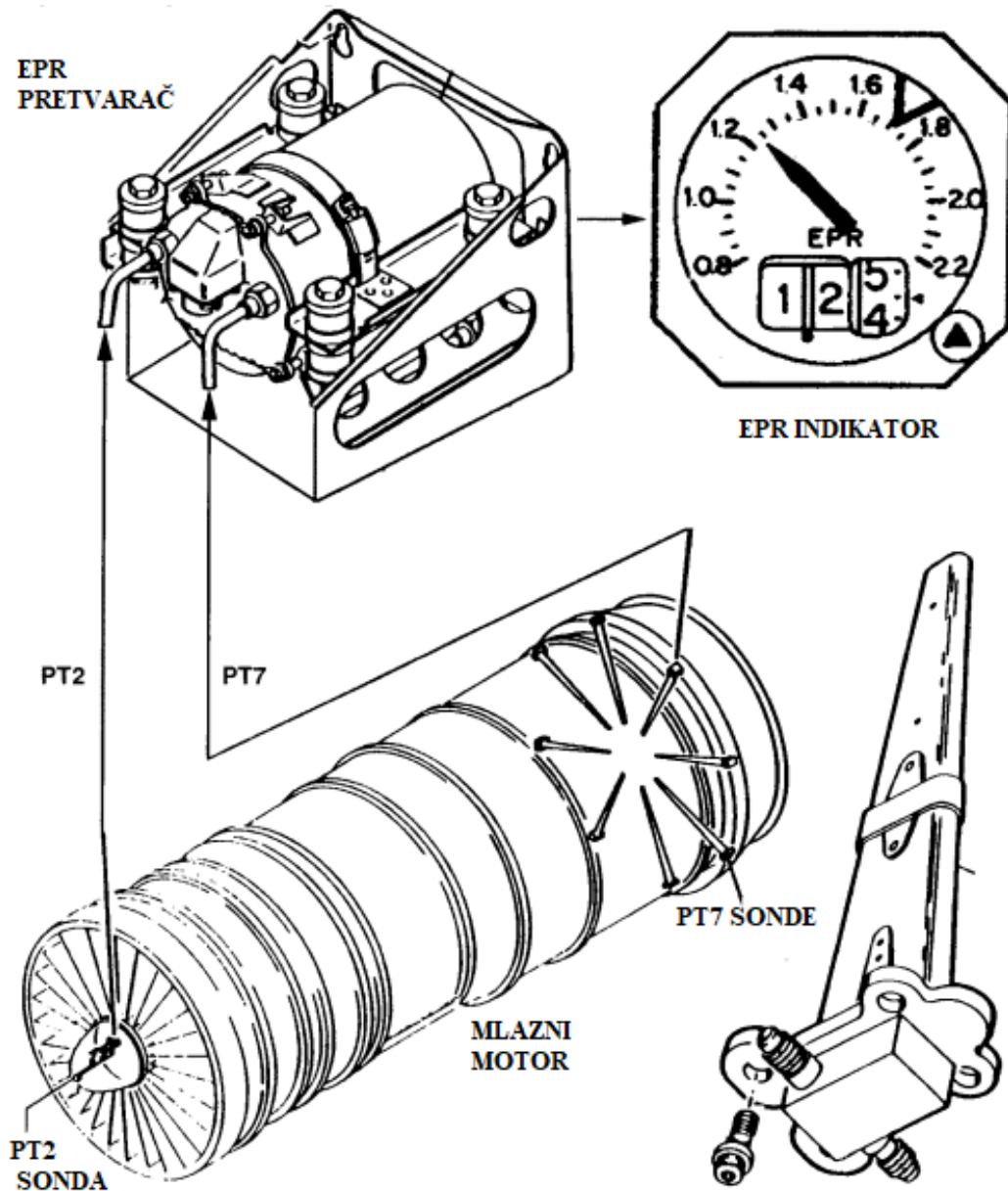
- $p_{t7}[Pa]$ – ukupni tlak na izlazu iz visokotlačne turbine
- $p_{t2}[Pa]$ – ukupni tlak na ulazu u kompresor



Slika 14: Pozicija sondi za mjerenje ukupnih tlakova motora [9]

Kao što se može vidjeti na slici 15., EPR sustav indikacije se sastoji od skupa p_{t7} sonde, p_{t2} sonde, razvodnika, EPR pretvarača i indikatora u pilotskoj kabini. Jedna p_{t2} sonda očitava ulazni tlak kompresora i šalje taj signal EPR pretvaraču. Nekoliko p_{t7} sonde preko razvodnika šalju signal ispušnog tlaka turbine u pretvarač. Dva signala se kombiniraju kako bi dali

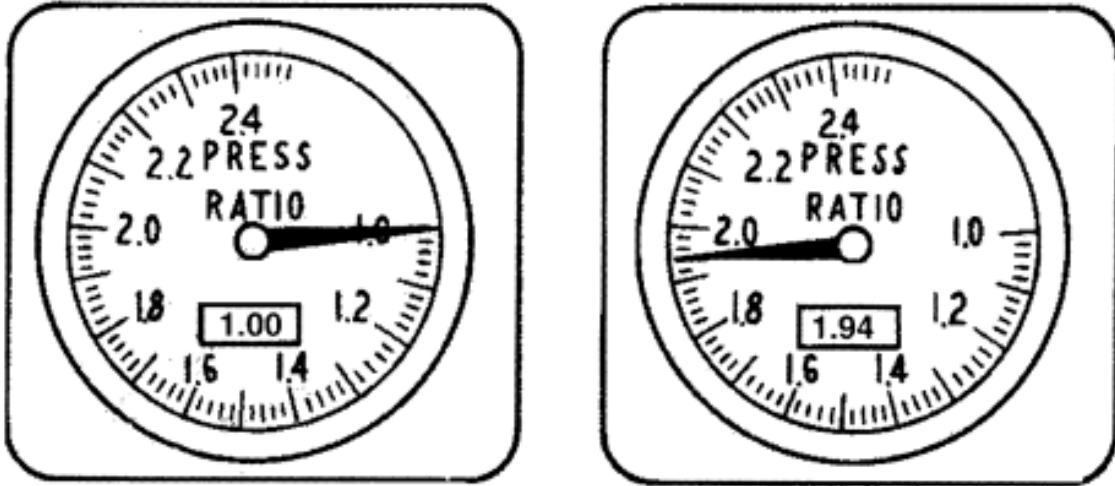
indikaciju omjera tlaka u kokpitu. Indikacija od 1,245 na indikatoru znači da je ispušni tlak p_{t7} turbine 1,245 puta veći od ulaznog tlaka kompresora p_{t2} . [9]



Slika 15: Pozicija i princip rada EPR sustava indikacije potiska [9]

U prednjem dijelu motora, p_{t2} sonda sklona je zaleđivanju što može dovesti do manjih komplikacija u očitavanju EPR, zbog toga se uključuje sustav grijanja u svrhu sprječavanja začepljenja ledom. Očitavanje se automatski kompenzira za učinke zračne brzine i visine uključivanjem unosa ulaznog tlaka kompresora. [9]

Očitavanje se prikazuje u kokpitu pomoću EPR indikatora što se može vidjeti na slici 16.



Slika 16: Tipični primjer indikatora EPR indikacije potiska [5]

Prikaznik s lijeve strane ima očitavanje $EPR = 1$ što znači da motor ne radi, odnosno omjer ukupnog tlaka mlaznika i ukupnog tlaka na ulazu u kompresor iznosi 1.

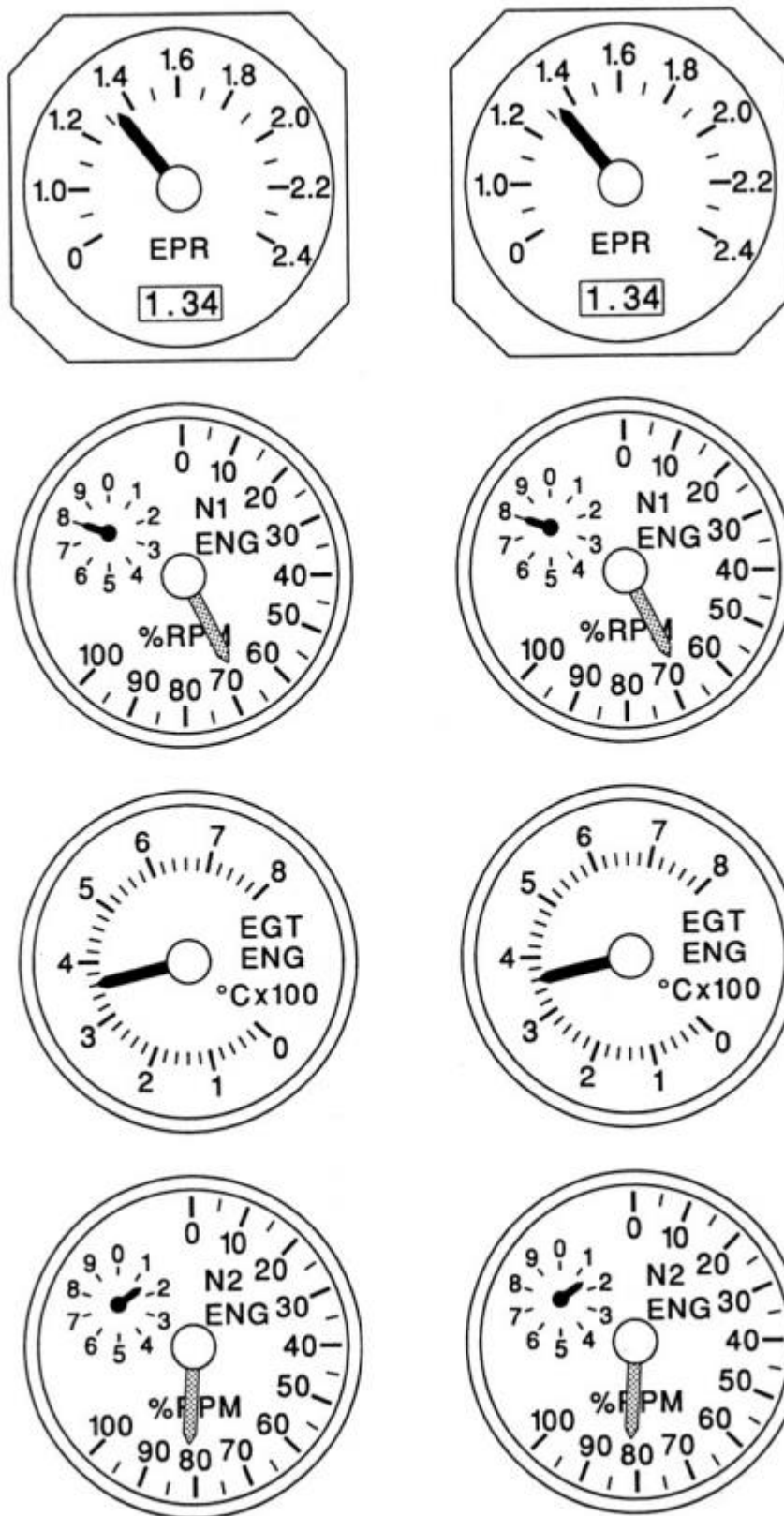
Prikaznik s desne strane ima očitavanje $EPR = 1.94$ što znači da motor radi, odnosno da je omjer ukupnog tlaka mlaznika i ukupnog tlaka na ulazu u kompresor jednak 1.94.

Indikator koji pokazuje samo tlak pražnjenja turbine u osnovi je mjerač, čiji se brojčanik može iščitavati u mjernim jedinicama kao što su [p.s.i.] (eng. *Pounds Per Square Inch*), inčima žive [in. Hg.] ili kao postotak maksimalnog potiska. EPR se može prikazati elektromehaničkim ili elektroničkim odašiljačima.[5]

EPR se koristi kao pokazatelj postavki performansi u mnogim pilotskim kabinama, a također se koristi kao indikator praćenja stanja na nekim motorima s nominalnom brzinom ventilatora koji koriste N1 brzinu ventilatora kao svoj primarni indikator potiska.[5]

Pratt & Whitney i Rolls Royce proizvođači koriste omjer tlakova motora EPR kao primarni sustav indikacije potiska.[6]

Slika 17. prikazuje tipični raspored motorskih instrumenata u kokpitu proizvođača koji je odabrao EPR metodu indikacije potiska kao primarnu metodu. Što se prepoznaje tako što je primarna indikacija potiska na vrhu rasporeda motorskih instrumenata.



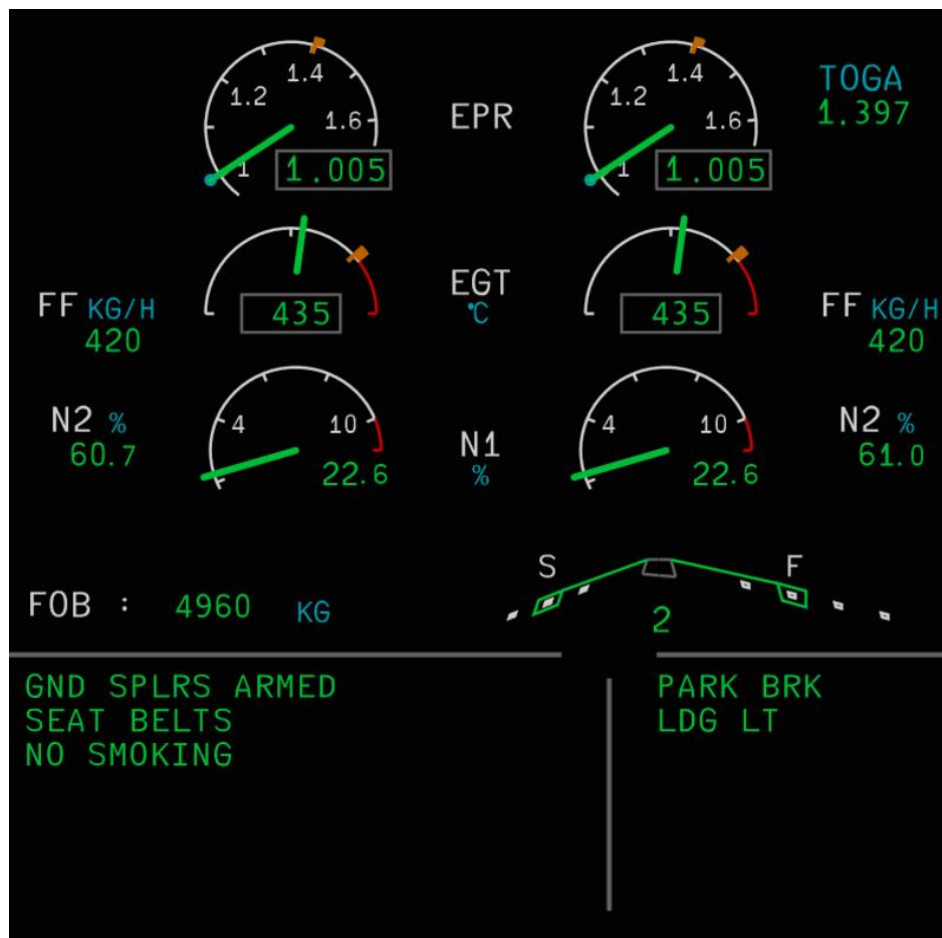
Slika 17: Raspored instrumenata pogonske jedinice mlaznog aviona P&W motora s EPR indikacijom potiska na vrhu [5]

Kod modernih sustava digitalnih instrumenata sa zaslonima, odašiljač omjera tlaka sadrži sklop s pretvaračem koji uspoređuje dva tlaka i pretvara omjer u električni signal koji je korigiran i prerađen u digitalni signal koji indikator potiska koristi za indikaciju.[7]

Jedan od takvih modernih sustava prikaza parametara motora je EICAS (eng. *Engine Indicating and Crew Alerting System*) karakterističan za tipove zrakoplova Boeing. To je integrirani prikaznički sustav poglavito zamišljen kao zamjena za klasične motorske instrumente. Sličan sustav kao i prije spomenuti sustav ECAM, namijenjen je prikazivanju i praćenju rada motorskih i ostalih sustava praćenja performansi motora. Također ima i funkciju upozorenja posade u zvučnom i slikovitom obliku, u slučaju prekoračenja limitacija motora, a prvi put je uporabljen u zrakoplovima Boeing 757 i Boeing 767.[7]

Prikaznički sustav EICAS radi u tri moda rada: operativnom, statusnom i servisnom. Za prikaz motorskih parametara bitan je prvi, operativni mod rada koji prikazuje informacije o radu motora i stanju sustava kao i upozornja posade tijekom leta. Kao i sustav ECAM, ima dva zaslona. Najčešće je uključen samo gornji zaslon dok se donji zaslon uključuje samo prema potrebi. Glavni zaslon MD (eng. *Main Display*) prikazuje primarne parametre motora (N1, EGT i EPR) te upozorenja i ograničenja.[7]

Slika 18. prikazuje raspored motorskih parametara u stanju *Idle* na gornjem zaslonu EICAS sustava u kokpitu zrakoplova tipa Boeing.



Slika 18: Primjer tipičnog prikaza EICAS sustava zrakoplova Boeing [8]

**B737 – 200 ADV
JT8D**

**TAKE-OFF AND GO-AROUND
N1 VERSUS EPR**

ENTER TABLE WITH ANY BLEED CONFIG. EPR		VALID FOR ALL AIRPORTS & JT8D ENGINES											
OAT-C	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
EPR	TARGET N1 PERCENT												
2.30	99	100	101	102	103	104	105	106	106	107	108	109	110
2.28	98	99	100	101	102	103	104	105	105	106	107	108	109
2.26	97	98	99	100	101	102	103	104	104	105	106	107	108
2.24	97	98	99	100	101	102	103	103	104	105	106	107	108
2.22	96	97	98	99	100	101	102	102	103	104	105	106	107
2.20	95	96	97	98	99	100	101	102	102	103	104	105	106
2.18	94	95	96	97	98	99	100	101	101	102	103	104	105
2.16	94	95	96	97	97	98	99	100	101	102	102	103	104
2.14	93	94	95	96	97	98	99	99	100	101	102	103	104
2.12	93	94	95	95	96	97	98	99	100	100	101	102	103
2.10	92	93	94	95	95	96	97	98	99	100	100	101	102
2.08	91	92	93	94	94	95	96	97	98	99	99	100	101
2.06	91	92	92	93	94	95	96	97	97	98	99	100	100
2.04	90	91	92	92	93	94	95	96	97	97	98	99	100
2.02	90	90	91	92	93	94	95	95	96	97	98	98	99
2.00	89	90	90	91	92	93	94	95	95	96	97	98	98
1.98	88	89	90	91	91	92	93	94	94	95	96	97	97
1.96	88	89	89	90	91	92	93	93	94	95	96	96	97
1.94	87	88	89	90	90	91	92	93	93	94	95	96	96
1.92	87	88	88	89	90	91	92	92	93	94	95	95	96
1.90	86	87	88	89	89	90	91	92	92	93	94	95	95
1.88	86	87	87	88	89	90	90	91	92	93	93	94	94
1.86	85	86	87	88	88	89	90	91	91	92	93	93	94
1.84	85	86	86	87	88	89	89	90	91	92	92	93	93
1.82	84	85	86	87	87	88	89	90	90	91	92	92	93
1.80	84	85	85	86	87	88	88	89	90	91	91	92	92
1.78	83	84	84	85	86	87	87	88	89	90	90	91	91
1.76	83	83	84	85	86	86	87	88	89	89	90	90	91
1.74	82	83	83	84	85	86	86	87	88	89	89	90	90
1.72	82	82	83	84	85	85	86	87	88	88	89	89	90
1.70	81	82	82	83	84	85	85	86	87	88	88	89	89
NOTE:	(I) READ TARGET N1 PERCENT WITH ACTUAL OAT FOR EITHER MAXIMUM OR REDUCED TAKE-OFF THRUST EPR												
	(II) N1 OPERATING TOLERANCE = 2 PERCENT												
	(III) TABLE IS VALID FOR ALL AIRPORTS												
N1 BLEED CORRECTIONS				ENG ANTI-ICE ON: ADD 1 PERCENT									

CAUTION

OBSERVE THE MAXIMUM OPERATIONAL N1 LIMITATIONS

Slika 19: Prikaz vrijednosti potiska N1 indikacije [%RPM] i EPR indikacije za B737 u režimu Take-off i Go-around [11]

Na slici 19 može se vidjeti prikaz vrijednosti potiska za zrakoplov B737 u režimu leta Take-off i Go-around pomoću N1 indikacije potiska [%RPM] i EPR indikacijom potiska u odnosu na vanjsku temperaturu OAT.

6. Usporedba indikacije potiska pomoću N1 i EPR

Usporedba dviju metoda indikacije potiska, N1 (brzina vrtnje ventilatora) i EPR (omjer tlakova motora) uključuje procjenu njihovih prednosti i nedostataka u implementaciji.

Dok N1 i EPR služe sličnoj svrsi ili funkciji, razlikuju se u nekoliko ključnih aspekata. Usporedba te dvije metode temeljit će se na ovih pet kriterija:

1. Točnost i preciznost indikacije
2. Vrijeme odziva
3. Jednostavnost u implementaciji
4. Održavanje i troškovi
5. Osjetljivost na vanjske uvjete

Uzimajući u obzir ovih pet kriterija, N1 i EPR imaju svoje prednosti i nedostatke.

6.1. Prednosti i nedostaci N1 metode indikacije potiska

Što se tiče indikacije potiska pomoću N1, najveća prednost koju karakterizira ova metoda indikacije potiska je jednostavnost u implementaciji. Jednostavnim mjerenjem koje pokazuje brzinu vrtnje ventilatora ili niskotlačnog kompresora i niskotlačne turbine te jednostavnijim principom rada sustava mjerenja od sustava mjerenja EPR-a. Ipak, time što točno i precizno mjeri brzinu vrtnje tih komponenata motora, ne mjeri stvarni potisak motora.[12]

N1 metoda indikacije potiska zahtjeva manje senzora u usporedbi s EPR sustavom. N1 sustav indikacije manje je složen što dovodi do nižih zahtjeva za održavanjem, samim time i manjim operativnim troškovima.[12]

Uzimajući u obzir faktor osjetljivosti na vanjske uvjete, N1 brzina vrtnje se ne prilagođava varijacijama atmosferskog tlaka, temperature ili nadmorske visine, kao rezultat toga odnos između N1 i stvarnog potiska može varirati u različitim uvjetima okoline, što je jedan od nedostataka.[12]

Što se tiče faktora vremena odaziva sustava, N1 brzo i instantno reagira na promjene inputa potiska od strane pilota u kokpitu pružajući direktnu povratnu informaciju, a što je neizmjerljivo bitno u najkritičnijim režimima leta kao što su polijetanje, TO (eng. *Take-off*), slijetanje, LDG (eng. *Landing*) i u slučaju izvođenja brzih manevara te u situacijama prekinutog slijetanja (eng. *Go around*).[12]

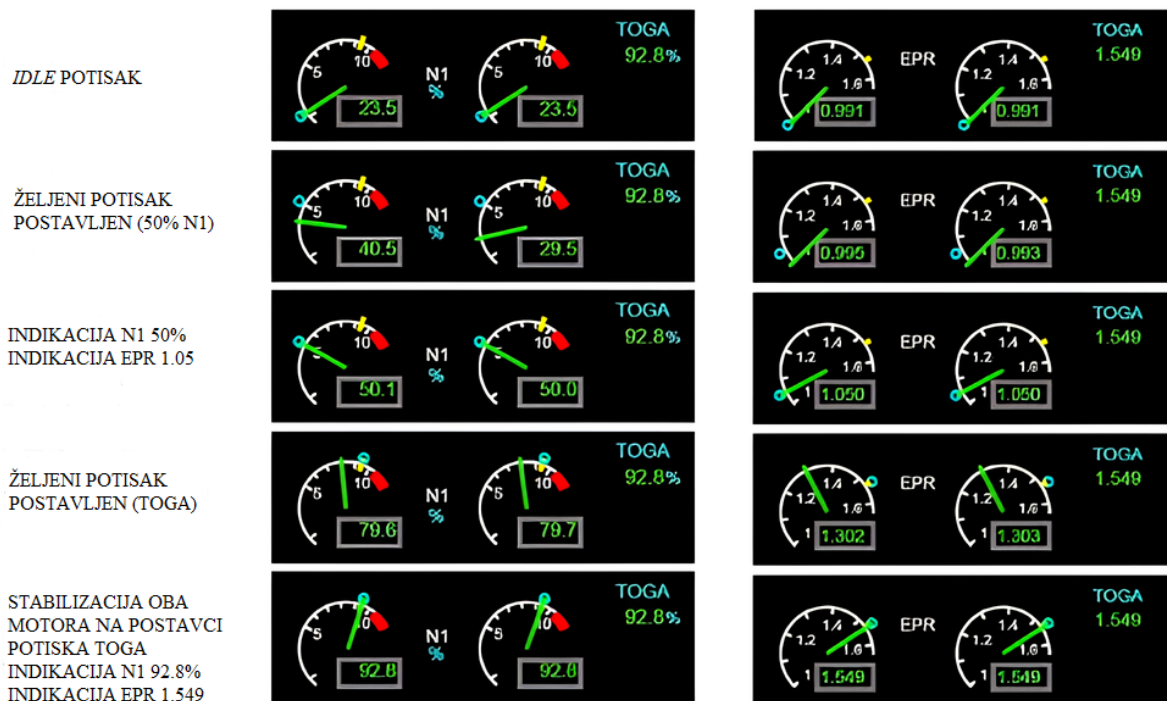
6.2. Prednosti i nedostaci EPR metode indikacije potiska

Glavna prednost EPR indikacije potiska je to što je EPR izravni pokazatelj potiska jer mjeri omjer tlakova ispuha i usisa motora, koji je bliže povezan sa stvarnim potiskom od mjerenja brzine vrtnje ventilatora motora. To čini ovu metodu općenito preciznijom u mjerenju performansi motora.[12]

U usporedbi s N1 metodom indikacije, sustav EPR indikacije potiska je složeniji, ima kompliciraniji sustav mjerenja. EPR ovisi o točnim očitanjima tlaka iz više sonde odjednom. Kvar na bilo kojoj od tih sonda može dovesti do netočnih indikacija, što bi potencijalno ugrozilo sigurnost. Sustav ima više senzora koje je potrebno točno kalibrirati i održavati što smanjuje jednostavnost u implementaciji te zbog većih zahtjeva za održavanjem, povećava troškove održavanja.[12]

Uzimajući u obzir faktor osjetljivosti na vanjske uvjete, po svom dizajnu, EPR očitavanje se automatski kompenzira za učinke zračne brzine i visine uključivanjem unosa ulaznog tlaka kompresora što je jedna od prednosti sustava.[12]

Što se tiče vremena odaziva indikacije, EPR ima sporiji odziv u usporedbi s N1 metodom, osobito kod brzih promjena inputa potiska od strane pilota. Odziv EPR indikacije nije trenutan, što je veliki nedostatak u kritičnim uvjetima leta gdje je očitavanje performansi potiska ključno. Na slici 20. se može vidjeti usporedba u vremenu odziva kod N1 i EPR indikacije potiska.[12]



Slika 20: Usporedba vremena odziva N1 i EPR indikacije potiska [8]

Slika 20. prikazuje tipičnu proceduru polijetanja s postavkom snage TOGA (eng. *Take-off Go Around*) gdje se vidi kasniji vremenski odaziv EPR indikacije u usporedbi s N1 indikacijom koja je gotovo pa trenutna.

Prema kriterijima usporedbe, tablica 1 uspoređuje prednosti i nedostatke obje metode indikacije potiska.

Tablica 1: Usporedba N1 i EPR metode indikacije potiska prema kriterijima usporedbe

	N1 INDIKACIJA	EPR INDIKACIJA
Točnost i preciznost indikacije	Nedostatak	Prednost
Vrijeme odaziva	Prednost	Nedostatak
Jednostavnost u implementaciji	Prednost	Nedostatak
Održavanje i troškovi	Prednost	Nedostatak
Osjetljivost na vanjske uvjete	Nedostatak	Prednost

N1 indikacija potiska ističe se po svojoj jednostavnosti, trenutnoj povratnoj informaciji i manjim troškovima održavanja, što ju čini idealnim za mnoge implementacije i eksploatacije komercijalnog zrakoplovstva.[13]

EPR, s druge strane, pruža točniju i sveobuhvatniju mjeru potiska, prilagođavajući se varijablama okoline i dajući bolji uvid u učinkovitost motora što ga čini poželjnijim za aplikacije visokih performansi i kritične učinkovitosti gdje je točnost i preciznost ključan faktor.[13]

Obje indikacije na neki način upotpunjuju vlastite nedostatke i prednosti, što znači da bi bilo najefikasnije i najsigurnije koristiti obje indikacije.

7. Zaključak

Neupitno je da je Indikacija potiska kritičan pokazatelj performansi mlaznog motora, pružajući bitne podatke koji omogućuju sigurnost, učinkovitost i evidentno praćenje performansi zrakoplova. Točna mjerenja potiska ključna su za optimalno upravljanje motorom, za sigurno i učinkovito izvođenje svih režima leta, za planiranje letnih operacija te samim time i za učinkovitost po pitanju potrošnje goriva, poštivanje radnih ograničenja i zahtjeva pogonske grupe zrakoplova.

I N1 i EPR indikacije potiska imaju svoje skupove izazova, prednosti i mane, a izbor između njih ovisi o specifičnim zahtjevima zrakoplova i motora, kao i operativnom kontekstu u kojem se koriste. Balansiranjem kompromisa između jednostavnosti, preciznosti, sigurnosti i operativnih troškova ključno je za odabir odgovarajuće metode indikacije potiska.

Usporedbom ove dvije metode, može se zaključiti da je N1 metoda indikacije potiska općenito prikladnija za operatere kojima je prioritet jednostavnost, lakoća upotrebe i niži zahtjevi za održavanjem. Posebno je korisna u komercijalnom zrakoplovstvu gdje je neposredna povratna informacija ključna. Nasuprot tome, EPR indikacija potiska je poželjnija za zrakoplove visokih performansi i kritične učinkovitosti, poput vojnog zrakoplovstva ili komercijalnih letova velikog dometa, gdje su precizno mjerenje potiska i optimizacija performansi motora najvažniji. U današnje vrijeme većina modernih mlaznih motora i zrakoplovnih sustava koriste obje metode u tandemu kako bi iskoristili prednosti svake od njih.

Literatura

- [1] Bazijanac E. *Zrakoplovni mlazni motori I. dio*. Autorizirana predavanja, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu; 2016.
- [2] ACADEMIA. *Klaus Hünecke Jet Engines Fundamentals of Theory*. Preuzeto s: https://www.academia.edu/6889926/Klaus_Hunecke_Jet_Engines_Fundamentals_of_Theory [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [3] Petrin D.: *Određivanje utjecaja stupnja optočnosti na performanse mlaznog motora*. Završni rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti; 2017. Preuzeto s: <https://repozitorij.fpz.unizg.hr/islandora/object/fpz%3A914> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [4] Walsh P.P., Fletcher P.: *Gas Turbine Performance*, second edition, Blackwell Science Ltd, 2004.
- [5] Jeppesen, *Aircraft instruments and avionics*, JAA ATPL Training Edition 2, Atlantic Flight Training Ltd., 2007.
- [6] Jeppesen, *Powerplant*, JAA ATPL Training Edition 2, Atlantic Flight Training Ltd., 2007.
- [7] Bucak T., Zorić I.: *Zrakoplovni instrumenti i prikaznici*. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, 2002.
- [8] <https://www.slideshare.net/slideshow/enginesppt-259157551/259157551> [Pristupljeno: rujan 2024.]
- [9] Rolls-Royce plc, *The Jet Engine*, 5th edition, Derby, 1996.
- [10] Airbus Industrie, *A320 Aircraft flight manual*, Francuska, veljača, 2012. Preuzeto s: <https://pdfcoffee.com/afm-airbus-a-320-pdf-free.html> [Pristupljeno: rujan 2024.]
- [11] The Boeing company, *Boeing 737 Operations Manual*, rujan, 2002.
- [12] Pratt & Whitney aircraft, *The aircraft gas turbine engine and its operation*, United Aircraft Corporation, East Hartford, Conn. 1958

Popis slika

Slika 1: Idealni <i>Bryton</i> -ov ciklus mlaznih motora u p-V i T, i-s dijagramu [1].....	3
Slika 2: Pojednostavljeni prikaz mlaznog motora [1].....	4
Slika 3: Poprečni presjek mlaznog motora [2]	4
Slika 4: Kontrolna površina mlaznog motora [3]	5
Slika 5: Karakterističan presjek optoćnog mlaznog motora[3]	8
Slika 6: Utjecaj povećanja stupnja optoćnosti na potisak [3].....	9
Slika 7: Prikaznik N1 indikacije potiska (A) i prikaznik EPR indikacije potiska (B)[5].....	10
Slika 8: Pozicija N1 i N2 obrtomjera [5].....	11
Slika 9: Pozicija elektronićkog obrtomjera koji mjeri N1 brzinu vrtnje ventilatora optoćnog mlaznog motora [5].....	12
Slika 10: Princip rada elektrinićnog N1 obrtomjera [6].....	13
Slika 11: Raspored instrumenata pogonske jedinice za mlazni avion s G.E. motorima i N1 indikacijom na vrhu [5].....	14
Slika 12: Primjer tipinićnog prikaza ECAM sustava zrakoplova Airbus [8].....	15
Slika 13: Prikaz vrijednosti potiska N1 indikacije [%RPM] za A320 CFM56-5B4 za rećim polijetanja [10].....	16
Slika 14: Pozicija sonde za mjerenje ukupnih tlakova motora [9]	17
Slika 15: Pozicija i princip rada EPR sustava indikacije potiska [9]	18
Slika 16: Tipinićni primjer indikatora EPR indikacije potiska [5]	19
Slika 17: Raspored instrumenata pogonske jedinice mlaznog aviona P&W motora s EPR indikacijom potiska na vrhu [5].....	20
Slika 18: Primjer tipinićnog prikaza EICAS sustava zrakoplova Boeing [8].....	21
Slika 19: Prikaz vrijednosti potiska N1 indikacije [%RPM] i EPR indikacije za B737 u rećimu Take-off i Go- around [11].....	22
Slika 20: Usporedba vremena odaziva N1 i EPR indikacije potiska [8].....	24

Popis tablica

Tablica 1: Usporedba N1 i EPR metode indikacije potiska prema faktorima usporedbe.....	25
--	----

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

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

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

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom **Usporedba indikacije potiska zrakoplovnog mlaznog motora pomoću brzine vrtnje i omjera ukupnih tlakova**,

u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica

U Zagrebu, 13.9.2024.



(ime i prezime, potpis)