

Parametarska analiza osnovnih veličina turboventilatorskog mlaznog motora

Klojčnik, Lara

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:160199>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-27**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Lara Klojčnik

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Tessa Uroić

Student:

Lara Klojčnik

Zagreb, 2025.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici, profesorima, kolegama i roditeljima.

Lara Klojčnik



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove.
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 25 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 25 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Lara Klojčnik**

JMBAG: **0035238578**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Parametarska analiza osnovnih veličina turboventilatorskog mlaznog motora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Parametric analysis of the basic variables of a turbofan jet engine**

Opis zadatka:

Poboljšanje iskoristivosti potiska turbomlaznih motora postiže se smanjivanjem izlazne brzine mlaza uz zadanu brzinu leta. Za ostvarivanje jednake sile potiska uz visoku iskoristivost, potrebno je povećati maseni protok zraka kroz motor, što se postiže dodavanjem ventilatora kojeg pokreće turbina mlaznog motora. Tada se strujanje kroz mlazni motor promatra u dva kontrolna volumena: primarni (topli) protok zraka kroz jezgru motora i sekundarni protok kroz obilazni kanal.

U okviru rada, studentica će:

- opisati konstrukcijske specifičnosti turboventilatorskog motora u usporedbi s turbomlaznim motorom,
- analizirati utjecaj razlike tlaka na ulazu i izlazu iz ventilatora na termodinamičku učinkovitost turboventilatorskog motora,
- analizirati utjecaj različite brzine strujanja na izlazu iz obilaznog voda i brzine strujanja primarnog zraka na izlazu iz mlaznice na potisak i specifičnu potrošnju goriva,
- analizirati utjecaj omjera sekundarnog i primarnog zraka na potisak, brzinu smjese primarnog i sekundarnog zraka na izlazu iz motora te na iskoristivost potiska.

Potrebno je provesti analitičku parametarsku analizu te grafički prikazati utjecaje pojedinih parametara na navedene veličine.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.
2. rok: 10. i 11. 7. 2025.
3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.
2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025.
3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Zadatak zadala:

Doc. dr. sc. Tessa Uroić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Milan Vrdoljak

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS TABLICA	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK	V
1. UVOD	1
1.1. KONSTRUKCIJSKE SPECIFIČNOSTI TURBOVENTILATORSKOG MLAZNOG MOTORA	1
1.2. NISKA RAZINA BUKE TURBOVENTILATORSKOG MLAZNOG MOTORA	3
2. PREGLED TUROVENTILATORSKIH MLAZNIH MOTORA	6
2.1 TURBOVENTILATORSKI MOTORI S NISKIM <i>BYPASS</i> OMJEROM	6
2.2 TURBOVENTILATORSKI MOTORI S VISOKIM <i>BYPASS</i> OMJEROM	8
2.3 PREGLED TURBOVENTILATORSKIH MOTORA DANAŠNJICE	9
3. <i>BYPASS</i> OMJER I PROCESI KROZ JEZGRU MOTORA I ZAIBILAZNI VOD	11
3.1 OMJER TLAKOVA VENTILATORA I <i>BYPASS</i> OMJER.....	11
3.2 PROCESI KROZ JEZGRU I ZAIBILAZNI VOD TURBOVENTILATORSKOG MOTORA	12
4. UTJECAJ OMJERA TLAKOVA VENTILATORA NA TERMODINAMIČKU UČINKOVITOST TURBOVENTILATORSKOG MOTORA	15
4.1 DEFINIRANJE OMJERA TLAKOVA VENTILATORA.....	15
4.2 UTJECAJ OMJERA TLAKOVA VENTILATORA	16
4.2.1 Ovisnost bypass omjera i omjera tlakova LP turbine o omjeru tlakova ventilatora	16
4.2.2 Ovisnost neto i bruto potiska o omjeru tlakova ventilatora	17
4.2.3 Ovisnost specifične potrošnje goriva i specifičnog potiska o omjeru tlakova ventilatora.....	18
4.3 UČINAK TEŽINE MOTORA I ODABIR OMJERA TLAKOVA VENTILATORA	19
5. EFEKT NEJEDNAKIH BRZINA MLAZA ZAIBILAZNOG VODA I JEZGRE	21
6. UTJECAJ OMJERA PRIMARNOG I SEKUNDARNOG ZRAKA NA OSTALE PARAMETRE	22
6.1 BRZINA MLAZA I ISKORISTIVOST POTISKA	22
6.2 POTISAK VENTILATORA MOTORA	23
7. ZAKLJUČAK.....	26
LITERATURA.....	27
PRILOZI	29

POPIS SLIKA

Slika 1. Usporedba konstrukcija turbomlaznog (lijevo) i turboventilatorskog (desno) motora, Izvor:[11]	2
Slika 2. Turbulentna kinetička energija za osnovnu mlaznicu (gore) i <i>Chevron</i> model mlaznice (dolje), Izvor: [7]	5
Slika 3. Kronološki razvoj <i>bypass</i> omjera, Izvor:[12].....	6
Slika 4. Pratt & Whitney JT8D turboventilatorski motor, Izvor: [13]	7
Slika 5. Pratt & Whitney TF30 turboventilatorski motor, Izvor: [14]	7
Slika 6. Prvi turboventilatorski motor s visokim <i>bypass</i> omjerom TF39, Izvor: [15]	8
Slika 7. Usporedba motora Boeinga 747 - JT9D (gore) i GEnx (dolje), Izvor: [16], [8]	9
Slika 8. Turboventilatorski motor CFM56-5B, Izvor: [17]	10
Slika 9. Rolls Royce Trent 900 (gore) i Engine Alliance GP7200 (dolje), Izvor: [18], [19] ...	10
Slika 10. Označavanje karakterističnih točaka turbomlaznog i turboventilatorskog mlaznog motora, Izvor: [1]	12
Slika 11. T-s dijagrami za motore s velikim <i>bypass</i> omjerom, Izvor: [1]	13
Slika 12. Ovisnost omjera tlakova niskotlačne turbine i <i>bpr</i> -a o <i>fpr</i> -u, Izvor: vlastita izrada ..	17
Slika 13. Ovisnost bruto i neto potiska o <i>fpr</i> -u, Izvor: vlastita izrada.....	18
Slika 14. Ovisnost specifičnog potiska i specifične potrošnje goriva o <i>fpr</i> -u, Izvor: vlastita izrada	19
Slika 15. Ovisnost nekorigiranog i korigiranog <i>sfc</i> -a o <i>fpr</i> -u, Izvor: [1].....	20
Slika 16. Shematski presjek turboventilatorskog motora, Izvor: [2].....	22
Slika 17. Graf ovisnosti potiska ventilatorskog dijela motora o parametru brzine <i>v</i> za različite <i>bpr</i> -ove, Izvor: vlastita izrada	24
Slika 18. Graf ovisnosti iskoristivosti potiska o parametru brzine <i>v</i> za različite <i>bpr</i> -ove, Izvor: vlastita izrada	25

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba parametara turboventilatorskog i turbomlaznog motora, Izvor: [20], [21]
.....3
Tablica 2. Usporedba parametara motora s istim i različitim brzinama mlaza, Izvor: [1]21

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
b_{pr}	-	Byass omjer, omjer hladne i tople struje
c_p	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet pri konstantnom volumenu
d	m	Promjer ventilatora
F_N	N	Neto potisak
f_{pr}	-	Omjer tlakova ventilatora
M	-	Machov broj
\dot{m}	kg/s	Ukupni maseni protok
\dot{m}_{air}	kg/s	Maseni protok zraka
\dot{m}_c	kg/s	Primarni maseni protok, topli tok
\dot{m}_F	kg/s	Sekundarni maseni protok, hladni tok
p	Pa	Statički tlak
p_0	Pa	Stagnacijski tlak
sfc	kg/Ns	Specifična potrošnja goriva
T	K	Statička temperatura
T	N	Potisak tople struje
T_F	N	Potisak hladne struje
T_0	K	Stagnacijska temperatura
V	m/s	Brzina
V_F	m/s	Brzina smjese toplog i hladnog mlaza
V_j	m/s	Brzina mlaza
V_{jb}	m/s	Brzina zaobilaznog mlaza
V_{jc}	m/s	Brzina mlaza jezgre
W	N	Težina
γ	-	Izentropski eksponent, c_p/c_v
η_d	-	Mehanička iskoristivost ventilatorske turbine
η_f	-	Izentropska učinkovitost
η_o	-	Ukupna učinkovitost
η_p	-	Iskoristivost potiska
η_{th}	-	Toplinska učinkovitost
η_{tr}	-	Prijenosna učinkovitost
ν	-	Parametar brzine

SAŽETAK

Najčešće korišteni motor u komercijalnom zrakoplovstvu je turboventilatorski mlazni motor budući da predstavlja optimalni kompromis u pogledu ostvarivanja dovoljnog potiska uz zadovoljavajuću iskoristivost motora, a što se postiže povećanjem masenog protoka dodavanjem ventilatora. Veliku ulogu u dimenzioniranju motora i ostvarivanju željenih performansi imaju dva omjera: omjer tlakova ventilatora (*fan pressure ratio*), *fpr*, koji određuje brzinu mlaza i promjer motora uz zadani potisak i omjer sekundarne i primarne struje zraka, tzv. *bypass* omjer, *bpr*. U okviru ovog rada opisane su konstrukcijske specifičnosti turboventilatorskog motora naspram turbomlaznog motora, analiziran je utjecaj *fpr*-a na termodinamičku učinkovitost turboventilatorskog motora, opisan je utjecaj omjera brzina strujanja hladne struje na izlazu iz zaobilaznog voda i tople struje na izlazu iz mlaznice na specifičnu potrošnju goriva i potisak te je provedena analiza utjecaja omjera primarnog i sekundarnog zraka na potisak, njegovu iskoristivost i brzinu smjese primarnog i sekundarnog zraka.

Ključne riječi: turboventilatorski motor, omjer tlakova ventilatora, *bypass* omjer, omjer brzina hladne i tople struje.

SUMMARY

Most common used engine in commercial aircraft is the turbofan engine because it is the best compromise in terms of achieving enough thrust with satisfactory efficiency of the engine what is achieved by increasing mass flow by adding a fan. Huge part in engine sizing and achieving desired performances have two ratios: fan pressure ratio, fpr , which determines jet velocity and diameter of the engine for a given thrust and bypass ratio, bpr . Within the scope of this paper design specifics of turbofan engine in opposition to turbojet engine are described, the impact of fpr on thermodynamic efficiency of turbofan engine is analysed, the impact of the flow rate ratio of the cold stream on the exit of the bypass duct and the warm stream at the nozzle outlet on specific fuel consumption and thrust is analysed and the analysis of the impact of primary and secondary air on thrust, its efficiency and velocity of the mixture of primary and secondary air was carried out.

Key words: turbofan engine, fan pressure ratio, bypass ratio, the ratio of the cold and warm stream velocities.

1. UVOD

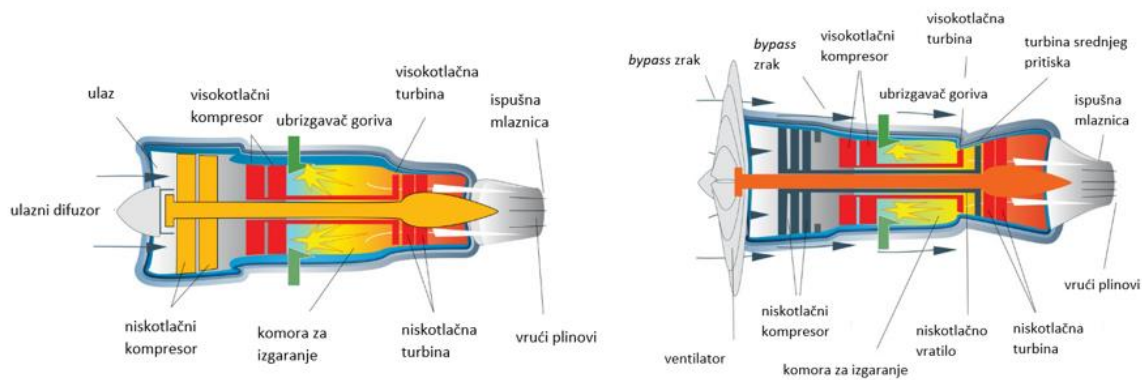
1.1. KONSTRUKCIJSKE SPECIFIČNOSTI TURBOVENTILATORSKOG MLAZNOG MOTORA

Prije dimenzioniranja motora i parametarske analize njegovih osnovnih veličina, potrebno je opisati konstrukcijske razloge zbog kojih je turboventilatorski mlazni motor u prednosti nad turbomlaznim motorom. Oba tipa motora rade na principu komprimiranja zraka do vrlo visokih tlakova i temperatura, zatim se u struju zraka u komori izgaranja ubrizgava gorivo te nakon izgaranja, vrući dimni plinovi predaju energiju lopaticama turbine te ekspandiraju do tlaka okoliša u mlaznici. Budući da je ciklus ovih procesa kontinuiran, svi su dijelovi motora neprestano u pogonu. Turbomlazni motor je u osnovi plinska turbina koja koristi svoj ispuh za stvaranje potiska, dok se kod turboventilatorskog motora potisak dominantno ostvaruje radom ventilatora. Kod turboventilatorskog motora ventilator ubrzava veliku količinu zraka oko plinske turbine, što predstavlja sekundarno strujanje u zaobilaznom vodu. Ovakva konfiguracija smanjuje temperature u turbini, povećava njenu učinkovitost i smanjuje razinu buke. Veza između ukupne učinkovitosti, toplinske učinkovitosti i iskoristivosti potiska turbomlaznog motora dana je izrazom:

$$\eta_o = \eta_p \times \eta_{th} \quad (1.1)$$

Kako bi se zadržala visoka toplinska učinkovitost, motor treba raditi s visokim ukupnim omjerom tlakova i visokim ulaznim temperaturama turbine. Ako se cijela dostupna energija na izlazu iz turbine koristi za ubrzavanje protoka jezgre, dolazi do velikih brzina mlaza. Velike brzine mlaza daju relativno nisku iskoristivost potiska za subsonične zrakoplove. Visoka iskoristivost potiska postiže se ostvarivanjem potiska relativno malim ubrzanjem velike protočne mase zraka.

Slika 1. prikazuje usporedbu konstrukcija oba motora iz koje se zaključuje da, uz razliku ventilatora na početku turboventilatorskog motora, a tim i njegovog većeg promjera, konstrukcija i radni procesi oba motora vrlo su slični, a uz to oba motora koriste isti tip goriva, [4].



Slika 1. Usporedba konstrukcija turbomlaznog (lijevo) i turboventilatorskog (desno) motora, Izvor:[11]

Kombinacija ograničenja η_{th} i η_p pokazuje da je za subsonični pogon najbolje koristiti turboventilatorski motor. Protok primarnog zraka kroz jezgru, odnosno plinsku turbinu ekspandira u turbini, a dobivena se snaga koristi za pokretanje ventilatora koji ubrzava protok velikog sekundarnog zraka u zaobilaznom vodu. Dio snage turbine koristi se za pogon dijelova za kompresiju u jezgri motora, prvo kompresiju blizu korijena ventilatora pa u niskotlačnom kompresoru. Niskotlačni kompresor poznat je kao *booster*. Toplinska učinkovitost definirana je kao porast kinetičke energije u mlaznici podijeljena s energijom sadržanom u gorivu.

Za turboventilatorski motor treba redefinirati toplinsku učinkovitost η_{th} . U brojniku stoji kinetička energija strujanja u jezgri koja ekspandira na okolišni tlak prije nego što preda rad dijelu ventilatora koji ubrzava sekundarnu struju. U računanju ove kinetičke energije treba se odrediti hipotetska točka u dijelu niskotlačne turbine gdje je rad predan za pogon kompresora i korijena ventilatora, ali nije predan vrhu lopatica ventilatora. Stoga se uvodi tzv. prijenosna učinkovitost η_{tr} koja uzima u obzir gubitke ostvarene prijenosom snage između niskotlačne turbine i ventilatora i ubrzavanja hladne struje, [1].

Izraz za ukupnu učinkovitost turboventilatorskog motora je:

$$\eta_o = \eta_p \times \eta_{th} \times \eta_{tr}. \quad (1.2)$$

Ukupna učinkovitost turboventilatorskog mlaznog motora prelazi ukupnu učinkovitost turbomlaznog motora s istom toplinskom učinkovitošću jezgre zato što poboljšanja u iskoristivosti potiska η_p kod turboventilatorskog motora znatno premašuju gubitke povezane s prijenosnom učinkovitošću protoka kroz jezgru do zaobilazne struje.

Odabir omjera tlaka ventilatora *fpr* može se promatrati kao izbor brzine mlaza zaobilaznog toka. Odabir brzine mlaza jezgre odluka je koliki će dio dostupne snage biti predan turbini i koliko će se energije trošiti za ubrzanje mlaza jezgre. Brzine mlaza jezgre i zaobilaznog toka uvijek su odabrane tako da budu slične radi minimiziranja buke i maksimiziranja iskoristivosti potiska. Snaga jezgre po jedinici mase protoka ovisi o ukupnom omjeru tlakova i ulaznoj temperaturi turbine. Jednom kad je odabran omjer tlakova ventilatora i omjer brzina hladne i tople struje, *bypass* omjer će slijediti iz snage po jedinici mase kroz jezgru, [1].

U Tablici 1. prikazani su neki od tipičnih parametara u brojkama za obje vrste motora iz kojih se vidi velika razlika u promjeru, težini i masenom protoku zraka, a isto tako otprilike dvostruko veći maksimalni potisak kod Concordea s turbomlaznim motorom naspram Airbusa A380 s turboventilatorskim motorom.

Tip	Rolls Royce Trent 900	Rolls Royce Olympus 593
Vrsta	turboventilatorski mlazni	turbomlazni
Zrakoplov	A380	Concorde
Promjer	2.794 m	1.212 m
Težina	6 271 kg	3 175 kg
maksimalni potisak	334.29 – 374.09 kN	169.2 kN
ukupni omjer tlakova	41	15.5
maseni protok zraka	1204 – 1245 kg/s	186 kg/s
specifična potrošnja goriva	16 g/kNs	33.8 g/kNs

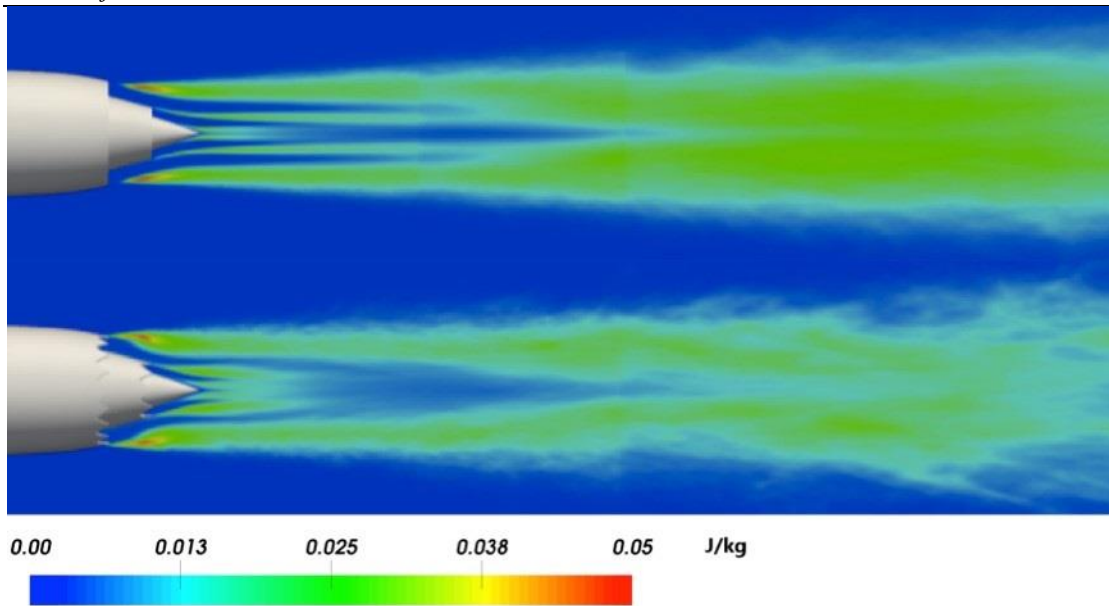
Tablica 1. Usporedba parametara turboventilatorskog i turbomlaznog motora, Izvor: [20], [21]

1.2 NISKA RAZINA BUKE TURBOVENTILATORSKOG MLAZNOG MOTORA

Buka zrakoplova složena je tema te je intenzitet pozitivno koreliran s povećanjem broja zrakoplova i povećanjem veličine motora. Turbinski motori proizvode zvukove koji se smatraju zagađivačima na određenim razinama glasnoće. Turboventilatorski motori inherentno su tiši od turbomlaznih motora za istu razinu potiska. Kod turbomlaznih motora potisak se stvara isključivo visokom brzinom mlaza dimnih plinova stoga konstrukcija mlaznice ima značajan utjecaj na izvedbu motora. U turbomlaznom motoru izlazna brzina doseže brzinu zvuka tijekom većine radnih uvjeta. Zvuk koji se proizvodi uzrokovan je turbulentnim miješanjem relativno

mirujućeg zraka izvan motora i mlaza vrućih plinova koji visokom brzinom izlaze iz mlaznice. Buka uzrokovana mlazom ispušnih plinova naziva se širokopojasna buka. Naspram toga, potisak turboventilatorskih motora razvija se okretanjem ventilatora koji ubrzava veću količinu zraka za nižu razliku brzina u usporedbi s turbomlaznim motorom čiji se potisak razvija isključivo pomoću plinske turbine. Stoga, izlazni mlaz turboventilatorskog motora, dajući jednak potisak kao i turbomlazni motor, sadrži manje energije, ali više mase, što rezultira stvaranjem manje buke. Intenzitet zvuka na bilo kojoj udaljenosti uglavnom je funkcija frekvencija tlačnih poremećaja u ispušnim plinovima. Niže frekvencije putuju dalje bez gubitka energije pa se čuju na većoj udaljenosti. Buka koju proizvode turbomlazni motori ima nižu frekvenciju od one koju proizvode turboventilatorski motori što je još jedan razlog zbog kojeg se turbomlazni motori smatraju „bučnijima“. Zbog ovih su razloga u ranim razvojjima zrakoplova turbomlazni motori, dok su još bili korišteni u civilnom zrakoplovstvu, bili opremljeni mlaznicama promjenjive geometrije. Učinak ovakvih mlaznica bio je smanjenje veličine pojedinačnog mlaza i povećanje frekvencije zvuka, ali istodobno su imale negativne aspekte kao što su smanjenje aerodinamičnosti i povećanje potrošnje goriva, [5].

Turboventilatorski mlazni motor značajno je unaprjeđeno konstrukcijsko rješenje u usporedbi s turbomlaznim motorom ako se razmatra generiranje buke. Međutim, radi se na daljnjem smanjenju buke i kod turboventilatorskog motora čiji su dominantni izvori ventilator te topli i hladni mlaz velike brzine. Optimizacija geometrijskog oblika i pasivna kontrola buke smatraju se najboljim i najučinkovitijim metodama smanjenja buke, [6]. Kao jedno od rješenja pojavljuje se *Chevron* mlaznica koja predstavlja dobar primjer optimizacije geometrijskog oblika. Dokazano je da značajno smanjuje buku mlaza omogućavanjem dobrog miješanja toplog i hladnog mlaza turboventilatorskog motora, [7].

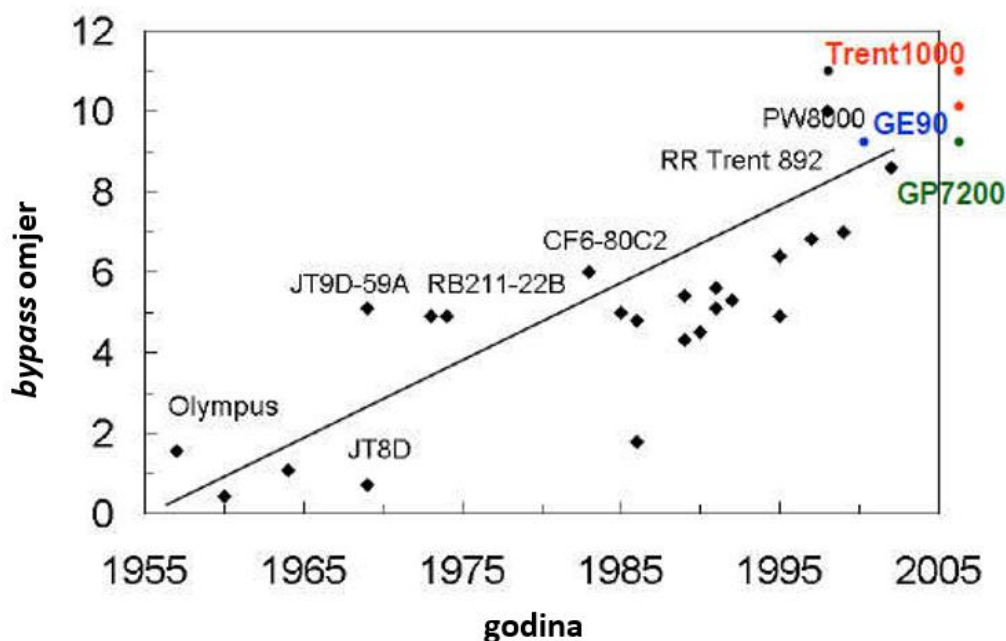


Slika 2. Turbulentna kinetička energija za osnovnu mlaznicu (gore) i *Chevron* model mlaznice (dolje), Izvor: [7]

Učinkovitost *Chevron* mlaznice maksimizirana je pri nižim frekvencijama što rezultira smanjenjem 5 – 7 dB u području vršne buke. Na Slici 2. može se vidjeti poboljšanje miješanja dvaju mlazova pomoću *Chevron* mlaznice.

2. PREGLED TUROVENTILATORSKIH MLAZNIH MOTORA

Iako je moguće turboventilatorske motore klasificirati na više načina, najčešća je podjela prema *bypass* omjeru koja većinom zadovoljava i kronološku podjelu tih motora. Prvi turboventilatorski motori imali su niži *bypass* omjer koji tijekom godina raste kako je prikazano na Slici 3.



Slika 3. Kronološki razvoj *bypass* omjera, Izvor:[12]

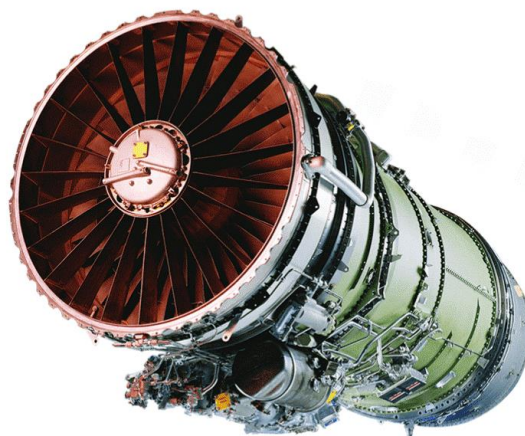
Najopćenitija podjela je na turboventilatorske motore s niskim *bypass* omjerom i na turboventilatorske motore s visokim *bypass* omjerom. Uz ovu podjelu u nastavku će biti prikazan i pregled najznačajnijih predstavnika svake skupine.

2.1 TURBOVENTILATORSKI MOTORI S NISKIM BYPASS OMJEROM

Izvor ovog potpoglavlja je knjiga [3]. Promatrajući performanse zrakoplova, danas je najznačajnija učinkovitost goriva. Uvođenjem ventilatora, a s njim zaobilaznog voda motora, moderni motori koriste manje goriva za stvaranje jednakog potiska od prijašnjih motora.

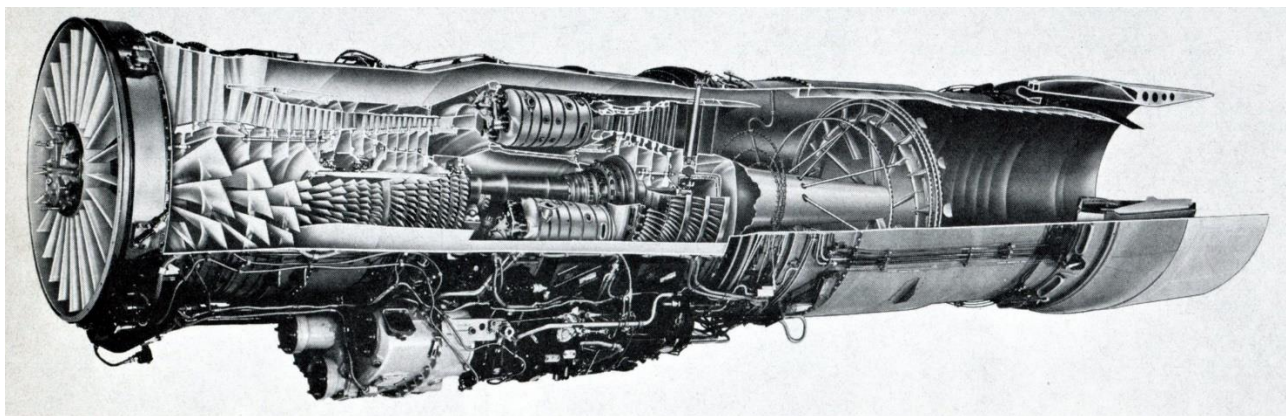
Bypass omjer u rasponu od 0.2 do 1 klasificira se kao nizak *bypass* omjer. Ovo znači da kroz zaobilazni vod prolazi 20 % - 100 % količine zraka koja prolazi kroz jezgru, odnosno 5 % - 50 % zraka na ulazu prolazi kroz zaobilazni vod i čini hladnu struju. Rani turboventilatorski motori civilnih zrakoplova imali su *bypass* omjer oko 1. Jedan takav predstavnik civilnog zrakoplovstva 60-ih godina prošlog stoljeća je Boeing 727 s trima Pratt & Whitney JT8D

turboventilatorskim motorima s *bypass* omjerom 1. Relativno velike ispušne brzine ovih motora generiraju razine buke neprihvatljive za civilno zrakoplovstvo današnjice pa zato takvi motori više nisu u upotrebi.



Slika 4. Pratt & Whitney JT8D turboventilatorski motor, Izvor: [13]

Motori s niskim *bypass* omjerom upotrebljavali su se u modernom borbenom zrakoplovstvu zbog ekonomičnosti potrošnje goriva na velikim brzinama leta. Predstavnik borbenog zrakoplova s dvama *Pratt & Whitney* TF30 turboventilatorskim motorima bio je *General Dynamics*-ov F-111, čiji je motor prikazan je na Slici 5.



Slika 5. Pratt & Whitney TF30 turboventilatorski motor, Izvor: [14]

2.2 TURBOVENTILATORSKI MOTORI S VISOKIM *BYPASS* OMJEROM

Tekst je uzet iz knjige [3]. Ekonomičnost civilnog zrakoplovstva znatno je poboljšana korištenjem turboventilatorskog mlaznog motora s visokim *bypass* omjerom. Ova inovacija predstavljena je vojnim zrakoplovom *Lockheed C5-A* te je ubrzo prilagođena za civilnu upotrebu. Motori s *bypass* omjerima 5 i više klasificirani su kao motori s visokim *bypass* omjerom. Prve civilne primjene ovog tipa motora našle su se kod visokokapacitivnih širokih zrakoplova poput Boeinga 747, Lockheed L-1011 TriStar i McDonnell Douglasa DC-10 u kasnim 1960-ima.



Slika 6. Prvi turboventilatorski motor s visokim *bypass* omjerom TF39, Izvor: [15]

Tipična značajka ovakvih motora je veliki jednostupanjski ventilator. Jezgra motora je plinska turbina koja osigurava visokoenergetsko stanje plina za pokretanje ventilatora koji je vratilom spojen na turbinu jezgre motora. Potisak stvoren strujanjem zraka kroz jezgru čini samo 15 % ukupnog potiska, što u konačnici označava visoku razinu potiska ovakvih motora uz prednost ekonomične potrošnje goriva nad turbomlaznim motorima ili turboventilatorskim motorima niskog *bypass* omjera.

2.3 PREGLED TURBOVENTILATORSKIH MOTORA DANAŠNJICE

U ovom potpoglavlju bit će predstavljeni najznačajniji turboventilatorski motori korišteni na današnjim civilnim zrakoplovima.

Prvi predstavnik je Genx motor („General Electric Next-generation“), korišten na Boeing 787 Dreamlineru i Boeingu 747-8, zrakoplovu koji je u počecima bio pogonjen Pratt & Whitney JT9D motorom. GENx motor jedan je od najtiših i najštedljivijih turboventilatorskih motora, konstruiran je kao nasljednik CF6, najprodavanijeg motora za širokotrupne zrakoplove, [9].



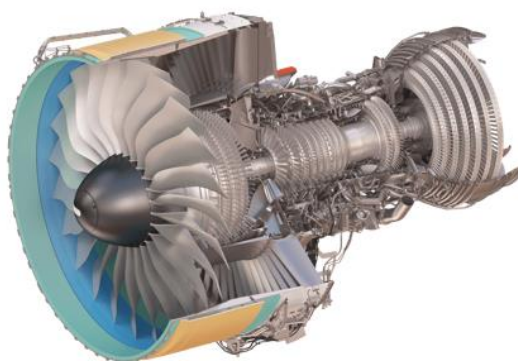
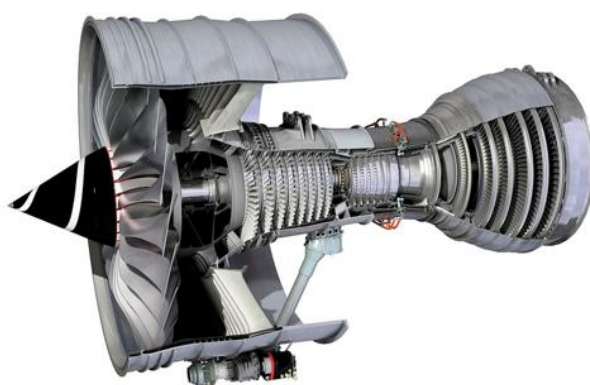
Slika 7. Usporedba motora Boeinga 747 - JT9D (gore) i GENx (dolje), Izvor: [16], [8]

Predstavnici civilne avijacije kraćih letova su Airbus A320 zrakoplovi koje najčešće pokreću CFM56 motori, koje proizvodi tvrtka CFM International čiji su zajednički vlasnici GE Aersopace i Safran Aircraft Engines. Motor je na tržištu preko 30 godina zbog svoje jednostavne i robusne konstrukcije koju karakterizira pouzdanost, izdržljivost i mogućnost popravka. Na Slici 8. prikaz je motora koji pokreće Airbus A320ceo.



Slika 8. Turboventilatorski motor CFM56-5B, Izvor: [17]

Airbus A380, jedan od najvećih četveromotornih putničkih zrakoplova na svijetu je opremljen s dvije vrste turboventilatorskih motora: Rolls-Royce Trent 900 ili Engine Alliance GP7200. Oba motora imaju visoki *bypass* omjer i izrađeni su posebno za zrakoplove A380 s oko 350 kN potiska po motoru što odgovara operativnim potrebama ovog zrakoplova, [10]. Slika 9. prikazuje te dvije izvedbe motora.



Slika 9. Rolls Royce Trent 900 (gore) i Engine Alliance GP7200 (dolje), Izvor: [18], [19]

3. BYPASS OMJER I PROCESI KROZ JEZGRU MOTORA I ZAIBILAZNI VOD

U radu je korišten teorijski pristup iz knjige [1]. U ovom poglavlju bit će prikazano kako se koristi omjer tlakova ventilatora kao zasebna varijabla u parametarskoj analizi ostalih značajnih veličina za optimalan rad motora te procesi koji se odvijaju unutar jezgre motora, gdje se odvija dovođenje topline (topla struja) i procesi u kojima sudjeluje hladna struja u zaobilaznomvodu.

3.1 OMJER TLAKOVA VENTILATORA I BYPASS OMJER

Omjer tlakova ventilatora jedan je od najvažnijih parametara prilikom konstruiranja motora. On predstavlja omjer tlaka na izlazu iz ventilatora i tlaka na ulazu u ventilator. Općenito je omjer tlakova ventilatora veći od 1.11. No, *bypass* omjer je i dalje više korišten pojam za opis tipa motora, budući da značajno utječe na izgled, veličinu i težinu motora. Duljina vojnog motora s niskim *bypass* omjerom tipično je 4 – 5 puta veća od svog promjera, dok su motori s visokom *bypass* omjerom dugi 1.5 - 2 svoja promjera. Prva generacija velikih komercijalnih motora imala je *bypass* omjere oko 5, a omjer kod modernih motora je do 10 (npr. GE9X, Trent 1000 i ostali). Zbog praktičnih razloga vezanih za minimalnu prihvatljivu brzinu lopatica turbine, *bypass* omjeri veći od 10 s direktnim prijenosom između turbine i ventilatora danas se ne koriste. Za više omjere potrebna je ugradnja reduktora između turbine i ventilatora kako bi turbina mogla biti manja i kako bi imala veću brzinu vrtnje. Kako bi se prikazao nedostatak korištenja *bypass* omjera za opisivanje ostalih parametara, bit će prikazana povijest generacija motora, od prvih s *bypass* omjerom oko 5 do današnjih s omjerom oko 10. Omjer tlakova ventilatora tijekom krstarenja za prvu generaciju turboventilatorskih motora bio je oko 1.5, što je otprilike isto kao kod današnje generacije velikih motora za komercijalne putničke zrakoplove. Drugim riječima, brzina mlaza za motore unutar 40 godina gotovo je ista, a pogonska učinkovitost je približno jednaka, dok projektirani omjer tlakova ventilatora nije ostao konstantan. Kako se potisak, počevši od starijih generacija, povećavao, ostavljajući promjer ventilatora konstantnim, povećao se omjer tlaka na ventilatoru, pa tako i brzina mlaza na izlazu. . Npr. RB211 koristeći isti promjer ventilatora, imao je poletni potisak povećan s 187 kN u 1972. do 269 kN u 1990., dok je u isto vrijeme specifična potrošnja goriva pala za 11%. Kako povećanje potiska mora biti rezultat povećanja brzine mlaza, pogonska učinkovitost se smanjila. Poboljšanje u specifičnoj potrošnji goriva bilo je najviše zbog poboljšanja u toplinskoj učinkovitosti jezgre motora kao rezultat većeg ukupnog omjera tlakova, veće ulazne temperature u turbinu i veće izentropske učinkovitosti kompresora i turbine. Iako omjer tlakova

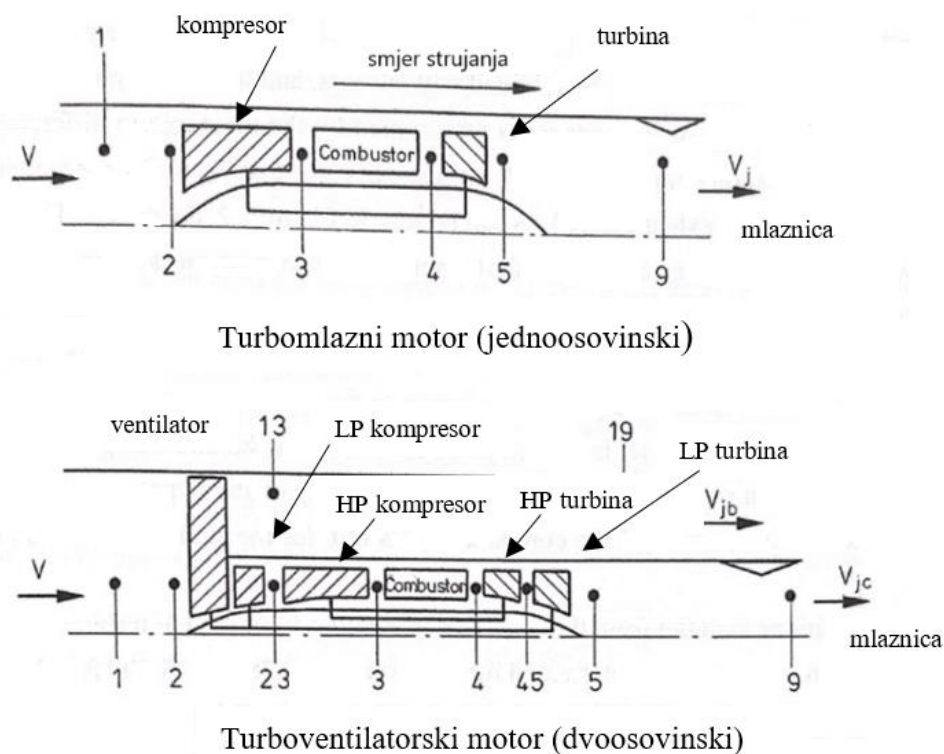
ventilatora dobro opisuje tip motora, može se koristiti i specifični potisak. On je definiran kao neto potisak podijeljen s cijelim masenim protokom:

$$\text{specific thrust} = F_N / \dot{m}_{air} = V_j - V. \quad (3.1)$$

Specifični potisak primjenjiviji je kod vojnih motora, gdje je i veća različitost između pojedinih konstrukcija motora. Primarna varijabla koja određuje V_j i specifičan potisak je omjer tlakova ventilatora.

3.2 PROCESI KROZ JEZGRU I ZAIBILAZNI VOD TURBOVENTILATORSKOG MOTORA

Za analizu u nastavku potrebno je označiti karakteristične točke u radnim ciklusima, odnosno pojedine dijelove motora, kako je prikazano na Slici 10. Za turboventilatorsku konfiguraciju s dva vratila, turbina je jednim vratilom spojena na kompresor, što odgovara toploj struji zraka, odnosno protoku kroz jezgru, a drugim vratilom na ventilator kroz kojeg pri korijenu lopatica prolazi topla struja, a bliže vrhu lopatica hladna struja.



Slika 10. Označavanje karakterističnih točaka turboblaznog i turboventilatorskog mlaznog motora, Izvor: [1]

niskotlačnog dijela turbine mora biti jednaka ukupnoj snazi ventilatora i niskotlačnog kompresora. Kinetička energija po jedinici masenog protoka mlaza jezgre odabrana je da bude slična kinetičkoj energiji *bypass* mlaza, kako bi se zadržala optimalna pogonska učinkovitost, a brzina *bypass* mlaza je određena omjerom tlakova ventilatora. Nizvodno od mlaznice jezgre motorai *bypassa*, statički tlak je atmosferski, p_a .

4. UTJECAJ OMJERA TLAKOVA VENTILATORA NA TERMODINAMIČKU UČINKOVITOST TURBOVENTILATORSKOG MOTORA

Poglavlje se temelji na podacima preuzetima iz knjige [1].

4.1 DEFINIRANJE OMJERA TLAKOVA VENTILATORA

Postupak konstruiranja motora počinje definiranjem omjera statičkih tlakova ventilatora p_{013}/p_{02} . Statički tlak u ventilatoru p_{02} veći je od atmosferskog tlaka p_a . Ako se zanemare gubici pada tlaka u zaobilaznom kanalu između ventilatora i zaobilaznog voda, tlak kroz mlaznicu dan je izrazom:

$$\frac{p_{013}}{p_a} = \frac{p_{013}}{p_{02}} \frac{p_{02}}{p_a} = fpr \frac{p_{02}}{p_a}. \quad (4.1)$$

Temperatura u mlaznici može se zapisati kao:

$$T_{013} = T_{02} \left(1 + \frac{fpr \frac{\gamma-1}{\gamma} - 1}{\eta_f} \right), \quad (4.2)$$

gdje je η_f izentropska učinkovitost ventilatora, $T_{02} = T_a (1 + 1/2 (\gamma - 1) M^2)$, a za izentropsku kompresiju vrijedi $p_{02}/p_a = (T_{02}/T_a)^{\gamma/\gamma-1}$.

Za protok kroz *bypass* pretpostavlja se izentropska ekspanzija i ubrzavanje strujanja kroz mlaznicu nizvodno do atmosferskog tlaka. Za omjere tlakova mlaznice manje od 3, ireverzibilnosti procesa bit će male. Brzina zaobilaznog mlaza je dana s:

$$V_{jb} = \sqrt{2c_p T_{013} - T_9} = \sqrt{2c_p T_{013} \left(1 - (p_a/p_{013})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)}. \quad (4.3)$$

Uzimajući omjer tlakova i temperaturu iz prethodnog izraza za zadane okolišne uvjete i Machov broj, brzina mlaza u zaobilaznom toku potpuno je određena omjerom tlakova ventilatora, uz pretpostavku konstantne izentropske učinkovitosti ventilatora.

Brzina mlaza kroz jezgru V_{jc} ovisi o statičkoj temperaturi i tlaku u mlaznici jezgre, T_{09} i p_{09} . Vrijedi pretpostavka da nema pada tlaka i gubitaka u prijenosu topline između izlaza niskotlačne turbine i ulaza u mlaznicu, pa je $p_{09} = p_{05}$ i $T_{09} = T_{05}$. Tlak na izlazu iz mlaznice aproksimiran je s $p_9 = p_a$. Brzina mlaza kroz jezgru dana je izrazom:

$$V_{jc} = \sqrt{2c_p T_{05} \left(1 - (p_9/p_{05})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)}. \quad (4.4)$$

Brzina mlaza jezgre sad se može odabrati u odnosu na brzinu zaobilaznog mlaza prilagođavajući omjer tlakova duž niskotlačne turbine, p_{045}/p_{05} . Brzine mlaza u zaobilaznom toku i jezgri približno su jednake:

$$V_{jc} = V_{jb}, \quad (4.5)$$

što odgovara maksimalnoj pogonskoj učinkovitosti. U ovoj su fazi određeni omjeri tlakova i brzine mlazova, ali ne i *bypass* omjer.

Snaga niskotlačne turbine $\dot{m}_c c_p (T_{045} - T_{05})$, gdje je \dot{m}_c maseni protok zraka kroz jezgru, jednaka je snazi uzetog ventilatoru i *boosteru*. Rezultantna jednadžba je

$$\dot{m}_c c_p (T_{045} - T_{05}) = \dot{m}_c c_p (T_{023} - T_{02}) + bpr \dot{m}_c c_p (T_{013} - T_{02}), \quad (4.6)$$

gdje su T_{023} i T_{013} temperature na izlazu iz *boostera* i ventilatora u zaobilazan tok. Temperaturni pad u niskotlačnoj turbini određen je njenom ulaznom temperaturom T_{045} i omjerom tlakova p_{045}/p_{05} , uzimajući u obzir izentropsku učinkovitost. Još je jedina nepoznanica *bypass* omjer.

Procedura izračunavanja sažeta je u nastavku, pretpostavljajući da su uvjeti na izlazu jezgre T_{045} i p_{045} dani, kao:

1. Odabir omjera tlakova ventilatora koji određuje brzinu zaobilaznog mlaza
2. Odabir omjera brzine mlaza jezgre i brzine zaobilaznog mlaza (ovdje su izjednačene)
3. Pretpostavka vrijednosti omjera tlakova niskotlačne turbine, p_{045}/p_{05}
4. Pronalazak T_{05} i p_{05}/p_a iz p_{045}/p_{05}
5. Izračunati brzinu mlaza jezgre V_{jc} i usporediti je s brzinom zaobilaznog mlaza V_{jb} . Ako je V_{jc} prevelika, povećati omjer p_{045}/p_{05} i vratiti se na točku 4.
6. Izračunati bruto i neto potisak po jedinici masenog protoka kroz jezgru.

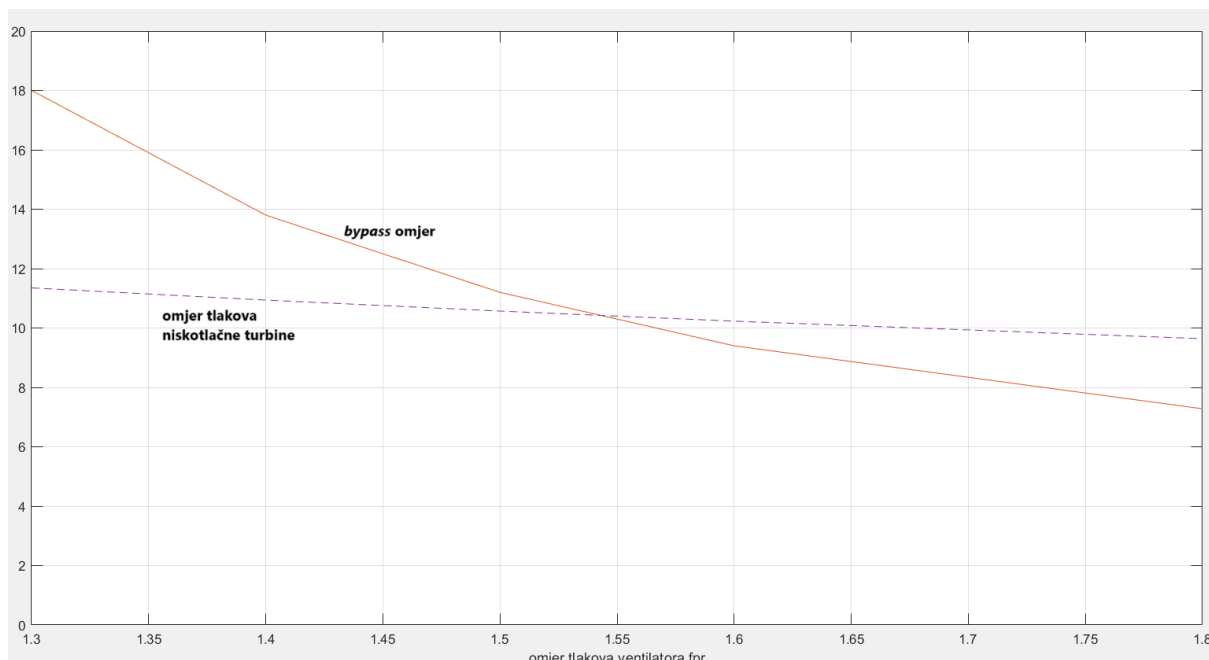
4.2 UTJECAJ OMJERA TLAKOVA VENTILATORA

Za svaki omjer tlakova ventilatora prikazan na grafu omjer tlakova niskotlačne turbine je određen u nekom rasponu dok su brzine mlazova jezgre i zaobilaznog toka jednake za odabrani omjer. Svi rezultati dobiveni grafovima su za konstantne uvjete ulaza u niskotlačnu turbinu, T_{045} i p_{045} , uz $T_{04} = 1500 \text{ K}$ te za let s $M = 0.78$ na 35 000 ft uz jednake brzine mlaza jezgre i *bypassa*.

4.2.1 Ovisnost *bypass* omjera i omjera tlakova LP turbine o omjeru tlakova ventilatora

Ovisnost *bypass* omjera o omjeru tlakova ventilatora prikazana je na Slici 12., s očekivanim rastom dok *fpr* opada; smanjenje *fpr*-a s 1.8 na 1.3 povećava *bypass* omjer

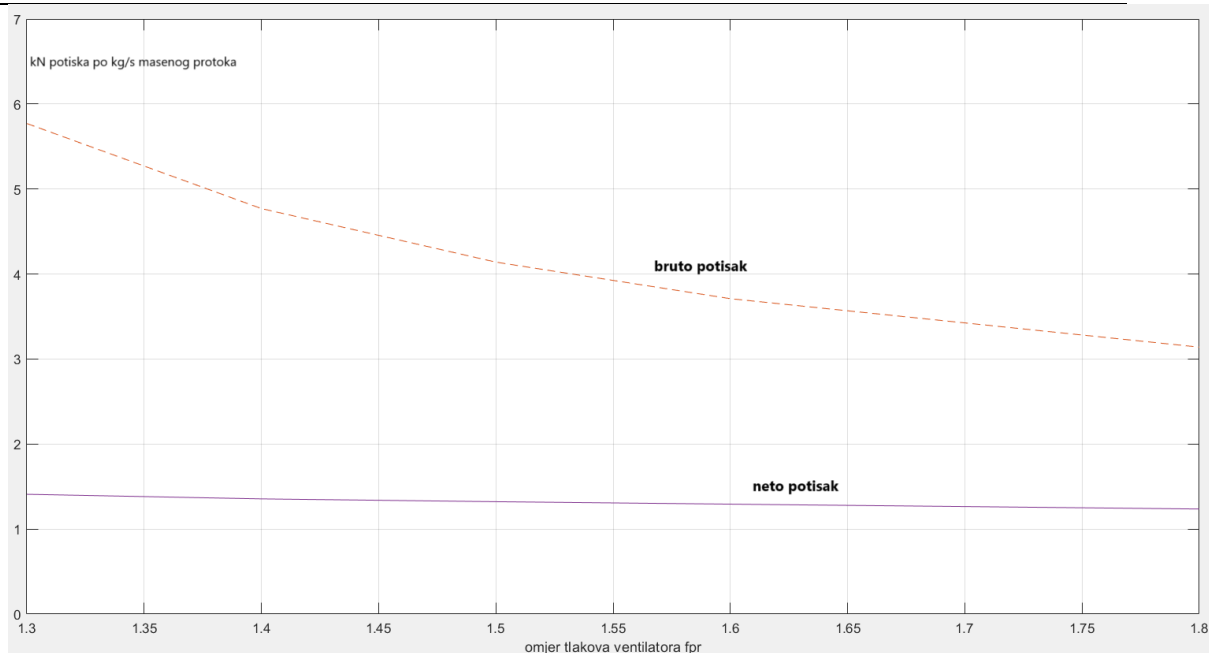
s otprilike 7 na 18. Kako brzina mlaza zaobilaznog toka opada smanjenjem omjera tlakova ventilatora, s njom opada i brzina mlaza jezgre u ovisnosti o izabranom omjeru tih dviju brzina. Kao rezultat, statički se tlak uzvodno od mlaznice jezgre smanjuje smanjenjem fpr -a, a također i ukupni omjer tlakova motora, za što je nužno da se pad tlaka u niskotlačnoj turbini poveća. Smanjenjem fpr -a s 1.8 na 1.3 omjer tlakova u niskotlačnoj turbini povećava se s otprilike 9.6 na 11.4. Graf sa Slike 12., kao i grafovi sa Slike 13. i Slike 14., dobiveni su u programu *Matlab* interpolacijom kroz točke dobivene analitičkim putem za čiji su izračun podaci preuzeti iz knjige [1]. Funkcijom *polyfit* dobiveni su koeficijenti polinoma 4. reda preko kojih se funkcijom *polyval* dobiju krivulje ovisnosti koordinata o fpr -u. Isti postupak korišten je za sve grafove u potpoglavlju 4.2.



Slika 12. Ovisnost omjera tlakova niskotlačne turbine i bpr -a o fpr -u, Izvor: vlastita izrada

4.2.2 Ovisnost neto i bruto potiska o omjeru tlakova ventilatora

Bruto i neto potisak po jedinici masenog protoka kroz jezgru kao funkcije fpr -a prikazani su na Slici 13. Bruto snaga značajno ovisi o fpr -u, skoro je udvostručena kako fpr opada s 1.8 na 1.3, prvotno jer se bpr dosta povećao. Neto potisak, međutim, ovisi puno manje o fpr -u, samo se mijenja za oko 14% duž istog raspona fpr -a. U uvjetima krstarenja neto snaga je značajnija, ali tijekom polijetanja, kad je unutarnji otpor mali, neto potisak gotovo je jednak bruto potisku. Za istu jezgru i isti potisak tijekom krstarenja, smanjenje fpr -a daje puno bolji potisak kod polijetanja.

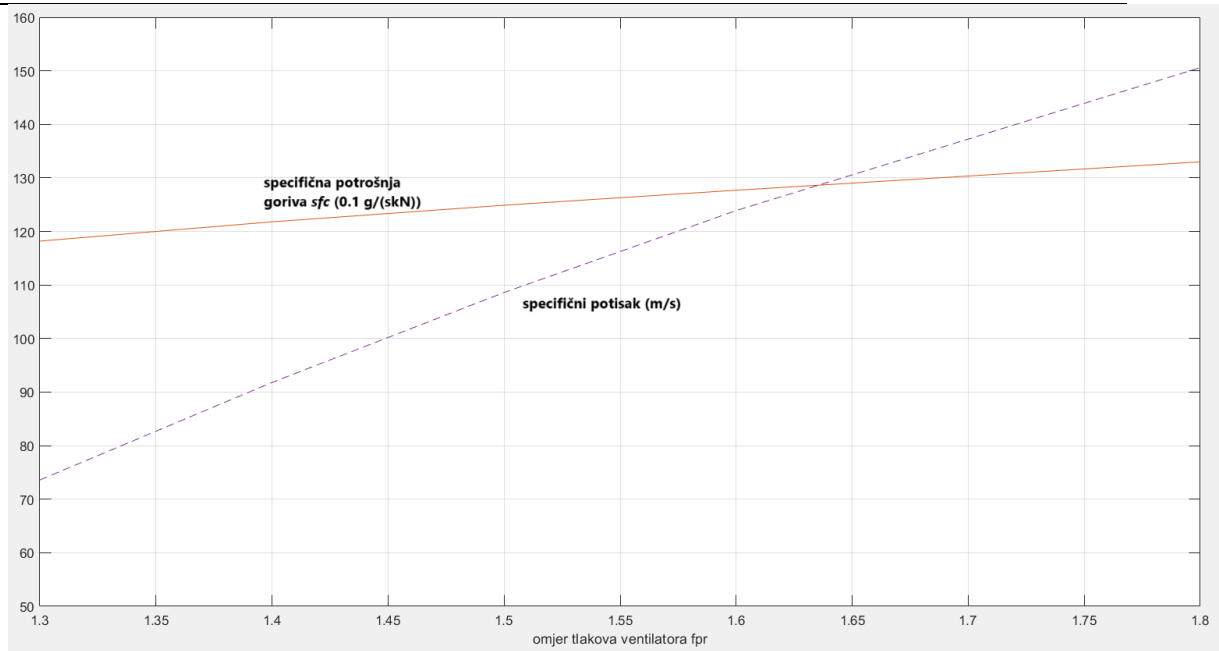


Slika 13. Ovisnost bruto i neto potiska o fpr -u, Izvor: vlastita izrada

4.2.3 Ovisnost specifične potrošnje goriva i specifičnog potiska o omjeru tlakova ventilatora

Promjene kod neto potiska na Slici 13. za konstantnu su jezgru, što znači da je brzina protoka mase goriva ista za sve fpr -ove. Zbog toga se promjene neto potiska prevode direktno u promjene specifične potrošnje goriva, sfc . Smanjenje sfc -a koje se događa smanjenjem fpr -a s 1.8 na 1.3 je oko 14%. (Smanjenje sfc -a za sami motor smanjenjem fpr -a s 1.8, vrijednosti tipične za prošlu generaciju motora, na sadašnjih 1.5 manje je od 6%). Na Slici 14. također je prikazana promjena specifičnog potiska promjenom fpr -a koji se i više nego prepolavlja u rasponu fpr -a od 1.8 do 1.3. Za danu vrijednost neto potiska bilo bi potrebno udvostručiti brzinu zraka kroz motor.

Do ovog je dijela teksta ignoriran učinak rashladnog zraka i pad tlaka u komori izgaranja. Također je korišten konstantni c_p i γ za plin, a navedena pojednostavljenja daju veći *bypass* omjer za isti fpr .



Slika 14. Ovisnost specifičnog potiska i specifične potrošnje goriva o *fpr*-u, Izvor: vlastita izrada

4.3 UČINAK TEŽINE MOTORA I ODABIR OMJERA TLAKOVA VENTILATORA

Značajka koja doprinosi ekonomskoj isplativosti mlaznog motora je smanjenje potrošnje goriva, koja je proporcionalna težini motora. Prosječna težina dva motora s kućištem i nosačem je oko 10% maksimalne težine prilikom uzlijetanja zrakoplova. Najveći doprinosi težini su povezani s niskotlačnim sustavom: ventilator, zaštitni prsten (bandaža) oko ventilatora (zadržava krhotine u slučaju da se lopatica ventilatora odvoji) i niskotlačna turbina. Kako je ventilator optimiran da daje niži omjer tlakova, okreće se sporije što znači da niskotlačna turbina mora biti veća i teža ako se između niskotlačne turbine i ventilatora ne koristi reduktor.

Posljedica smanjenja omjera tlakova ventilatora je da je potreban veći maseni protok zraka za isti neto potisak. To znači da će motor biti veći kako raste poprečni presjek usisnika, odnosno ventilatora da bi se povećao maseni protok. Težina je ovisna o promjeru ventilatora, najjednostavnije procijenjeno težina bi se povećala približno proporcionalno kvadratu promjera ventilatora:

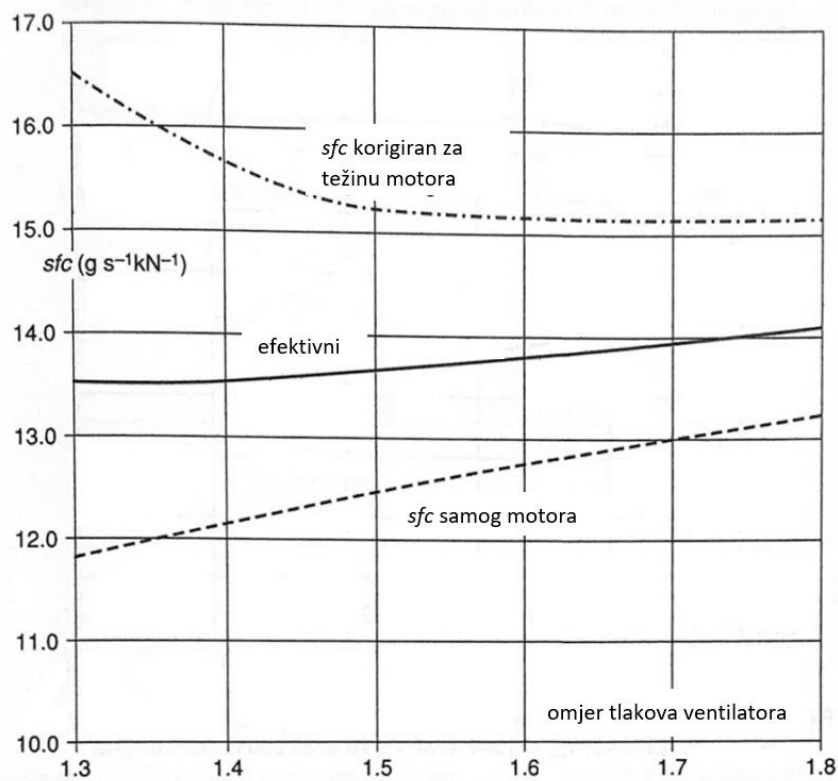
$$W_{engine} \propto d^{2.4}. \quad (4.7)$$

Korigirani potisak, nakon oduzimanja otpora prepisanog težini motora, dan je izrazom

$$F_{Nkorigirano} = F_{Nefektivno} - \frac{W_{motor}}{\frac{L}{D}}. \quad (4.8)$$

Iako su empirijske procjene težine motora i njene ovisnosti o promjeru ventilatora samo aproksimirane, Slika 15. pokazuje kako uzimanje u obzir težine značajno utječe na fpr , te je optimalni omjer tlaka ventilatora približno jednak 1.6, a pojavljuje se pri minimalno korigiranom izgaranju goriva.

Kako se motor povećava, što znači niži fpr , postaje teže smjestiti motor ispod krila bez velikog pada omjera uzgon-otpor krila. Da se izradi jako velik motor, sama konstrukcija zrakoplova bi bila lošija: npr., krila bi trebala biti više iznad podloge što bi zahtjevalo duže podvozje, što povećava težinu i zrakoplov može biti, uključujući trup, previsok. Iz navedenih razloga te kako bi se smanjila buka motora, potrebno je smanjiti omjera tlakova ventilatora, za što se provodi empirijsko ispitivanje otpora zrakoplova. Stoga, motor kod novog učinkovitog zrakoplova bit će baziran na $fpr = 1.5$.



Slika 15. Ovisnost nekorigitiranog i korigiranog sfc -a o fpr -u, Izvor: [1]

5. EFEKT NEJEDNAKIH BRZINA MLAZA ZAIBILAZNOG VODA I JEZGRE

Podaci u poglavlju preuzeti su iz knjige [1]. Do sada su se u razmatranjima pretpostavljale jednake iznose brzine jezgre i zaobilaznog voda. Najmanja specifična potrošnja goriva, sfc , i najviši neto potisak dobije se s omjerom $V_{jb}/V_{jc} \approx 0.92$, ali u usporedbi s prijašnje uzetim razmatranjem $V_{jb}/V_{jc} = 1.0$, poboljšanje je manje od 0.1%. Iako su razlike u specifičnoj potrošnji goriva male za različite omjere V_{jb}/V_{jc} , značajne su promjene parametara motora, vidljivo u Tablici 2 u kojoj su uspoređeni parametri motora s istim brzinama zaobilaznog voda i jezgre te s njihovim omjerom 0.92. Tablica 2. vrijedi za konstantan omjer tlakova ventilatora, $fpr = 1.5$ te konstantan neto potisak. Ulazni uvjeti u niskotlačnu turbinu i u ventilator jednaki su do sad razmatranima. Iako je razlika u neto potisku i sfc -u mala, primjetne su razlike u zaobilaznom toku i u jezgri nizvodno od niskotlačne turbine.

Maseni protok motora		$V_{jb} = 0.92V_{jc}$ 382 kg/s	$V_{jb} = V_{jc}$ 392 kg/s
Strujanje kroz jezgru	v_{jc}	369 m/s	340 m/s
	p_{05}	36.7 kPa	34.4 kPa
	T_{05}	586 K	578 K
	$T_{045} - T_{05}$	447 K	456 K
	Površina mlaznice	0.530 m^2	0.593 m^2
Strujanje kroz <i>bypass</i>	V_{jb}	340 m/s	340 m/s
	p_{013}/p_{02}	1.50	1.50
	T_{013}	278.9 K	278.9 K
	Površina mlaznice	2.71 m^2	2.78 m^2
	<i>Bypass</i> omjer	10.92	11.2
Ventilator	Promjer vrha	2.63 m	2.66 m

Tablica 2. Usporedba parametara motora s istim i različitim brzinama mlaza, Izvor: [1]

Zanimljiva je promjena promjera ventilatora koja pokazuje da ventilator s nejednakim brzinama mlazova ima manji promjer za 30 mm. Ovo ima vidljiv učinak na težinu (od otprilike 3%) i na otpor kućišta (oko 2%); drugim riječima prednost motora s nejednakim brzinama je ta što daje malo manji i malo lakši motor. Kako bi se smanjila težina i otpor, omjer V_{jb}/V_{jc} može biti izabran ispod te vrijednosti za najmanji sfc samog motora.

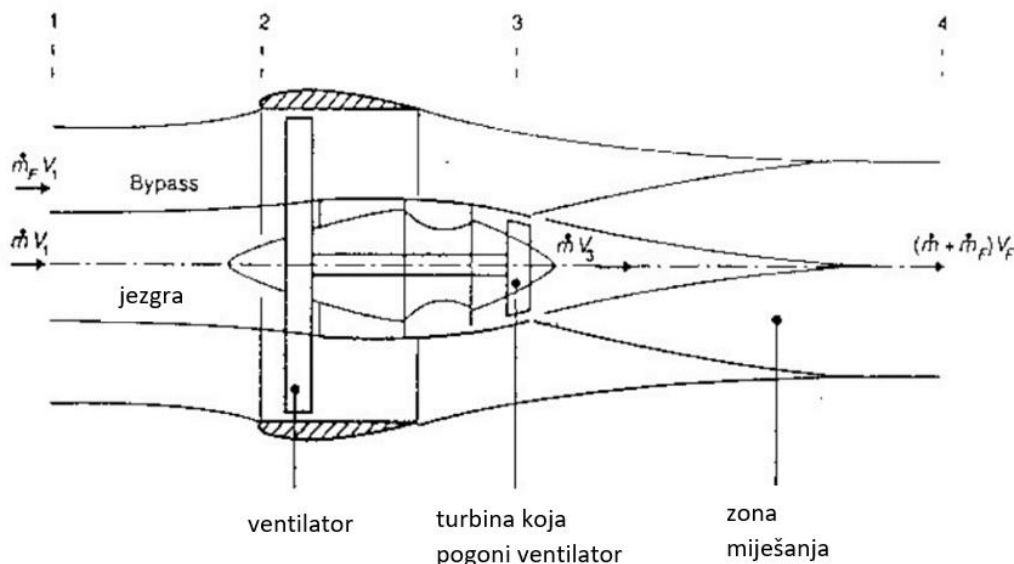
6. UTJECAJ OMJERA PRIMARNOG I SEKUNDARNOG ZRAKA NA OSTALE PARAMETRE

U ovom poglavlju, koje se temelji na knjizi [2], analitički i dijagramski će biti prikazan utjecaj omjera primarnog i sekundarnog zraka, *bpr*, na potisak, iskoristivost potiska i brzinu smjese primarnog i sekundarnog zraka.

Iskoristivost potiska η_p povećava se smanjenjem izlazne brzine mlaza V_4 , uz zadanu brzinu leta što pokazuje jednadžba:

$$\eta_p = \frac{\text{iskoristiva snaga}}{\text{raspoloživa snaga}} = \frac{TV_1}{0.5(\dot{m}V_4^2 - \dot{m}_a V_1^2)} = \frac{2v}{1+v} = \frac{2}{1+n}, \quad (6.1)$$

gdje je $v = V_1/V_4$ parametar brzine, dok je $n = 1/v$, tj. $n = V_4/V_1$.



Slika 16. Shematski presjek turboventilatorskog motora, Izvor: [2]

6.1 BRZINA MLAZA I ISKORISTIVOST POTISKA

Turbina daje energiju za pokretanje ventilatora tako što nju pokreće topla struja koja prolazi kroz motor. Odgovarajuće energije ovog procesa, zanemarujući gubitke uslijed miješanja tople i hladne struje, su:

1. gubitak kinetičke energije mlaza tople struje: $\frac{1}{2} \dot{m} (V_4^2 - V_F^2)$
2. povećanje kinetičke energije hladne struje: $\frac{1}{2} \dot{m}_F (V_F^2 - V_1^2)$,

gdje su: V_1 brzina leta, V_4 brzina mlaza tople struje bez hladnog toka, a V_F brzina smjese toplog i hladnog mlaza na mjestu 4, vidljivo na Slici 16.

Mehaničku iskoristivost η_d ventilatorske turbine moguće je definirati iz zakona očuvanja energije:

$$\frac{1}{2} \dot{m} (V_4^2 - V_F^2) \eta_d = \frac{1}{2} \dot{m}_F (V_F^2 - V_1^2). \quad (6.2)$$

To jest:

$$bpr = \frac{\dot{m}_F}{\dot{m}} = \eta_d \frac{V_4^2 - V_F^2}{V_F^2 - V_1^2} \quad (6.3)$$

Normiranjem svih brzina s brzinom mlaza dobiva se:

$$bpr \left(\left(\frac{V_F}{V_4} \right)^2 - \left(\frac{V_1}{V_4} \right)^2 \right) = \eta_d \left(1 - \left(\frac{V_F}{V_4} \right)^2 \right), \quad (6.4)$$

A supstitucijom $v = V_1/V_4$ te $v_F = V_F/V_4$ slijedi:

$$bpr v^2 \left(\frac{1}{v_F^2} - 1 \right) = \eta_d \left(1 - \frac{v^2}{v_F^2} \right) \quad (6.5)$$

Izrazi li se V_F/V_4 iz jednadžbe (6.4) dobivamo:

$$\left(\frac{V_F}{V_4} \right)^2 = \frac{bpr \left(\frac{V_1}{V_4} \right)^2 + \eta_d}{bpr + \eta_d}, \quad (6.6)$$

A iz (6.5) za v_F/v proizlazi izraz:

$$\left(\frac{v_F}{v} \right)^2 = \frac{1 + \frac{\eta_d}{bpr}}{v^2 + \frac{\eta_d}{bpr}}. \quad (6.7)$$

Vrijednosti za η_d kreću se oko 0.9. U slučaju kad je bpr jako velik, η_d i v_F teže jedinici, [2].

6.2 POTISAK VENTILATORA MOTORA

Potisak turboventilatorskog motora slijedi iz jednadžbe:

$$T = \dot{m} V_4 - \dot{m}_a V_1, \quad (6.8)$$

gdje je \dot{m} protočna masa smjese zraka i goriva, a \dot{m}_a protočna masa zraka.

Potisak tople struje, uz zanemarivanje masenog protoka goriva, glasi:

$$T = \dot{m} V_4 \left(1 - \frac{V_1}{V_4} \right), \quad (6.9)$$

dok je taj izraz za ventilatorski dio motora:

$$T_F = (\dot{m} + \dot{m}_F)(V_F - V_1) = \dot{m} V_4 (1 + bpr) \left(\frac{V_F}{V_4} - \frac{V_1}{V_4} \right). \quad (6.10)$$

Kad zrakoplov polijeće, $V_1 = 0$, jednadžbe (6.6) i (6.10) pretvaraju se u:

$$\left(\frac{V_F}{V_4}\right)_{v_1=0}^2 = \frac{\eta_d}{bpr + \eta_d}, \quad (6.11)$$

$$\left(\frac{T_F}{T}\right)_{v_1=0} = (1 + bpr) \left(\frac{V_F}{V_4}\right)_{v_1=0}. \quad (6.12)$$

U idealnom slučaju, kad je $\eta_d = 1$, vrijedi:

$$\left(\frac{V_F}{V_4}\right)_{v_1=0} = \sqrt{\frac{1}{bpr + 1}}. \quad (6.13)$$

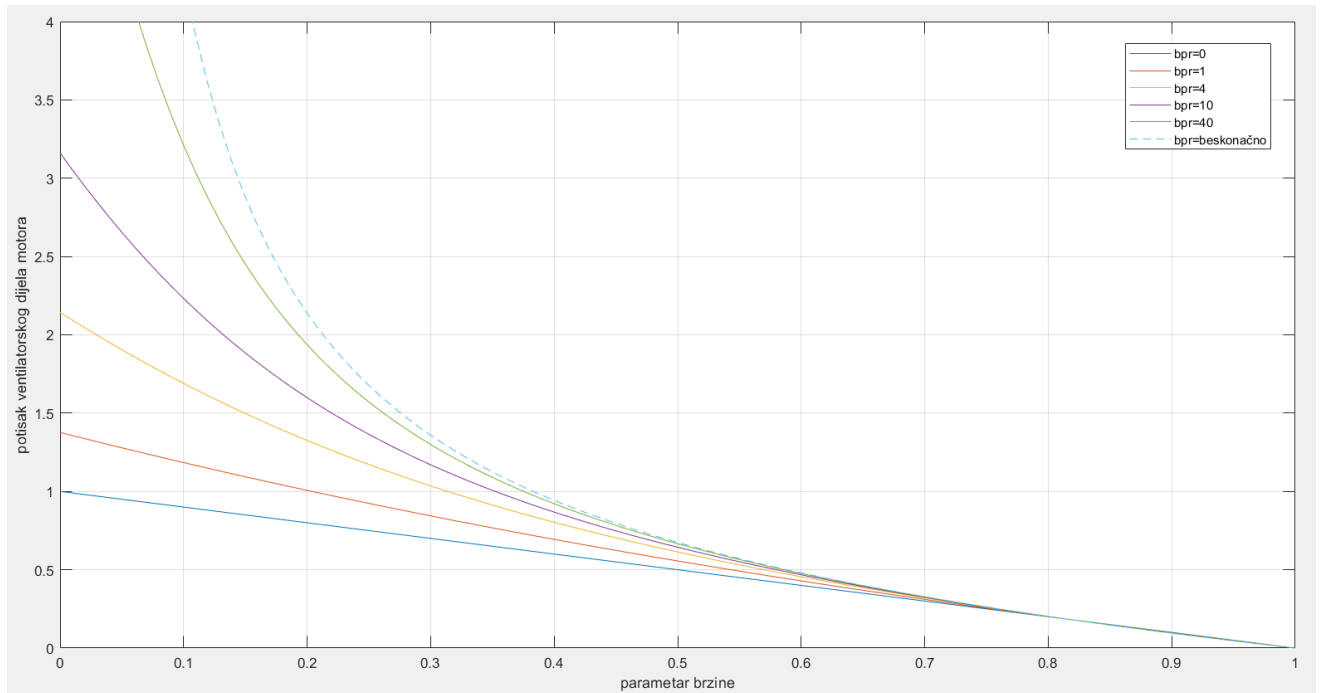
Uvrštavanjem prethodnog izraza u (6.12) slijedi:

$$\left(\frac{T_F}{T}\right)_{v_1=0} = \sqrt{bpr + 1}. \quad (6.14)$$

Slika 17. prikazuje graf ovisnosti potiska ventilatorskog dijela motora T_F/T_0 u ovisnosti o parametru brzine v za različite vrijednosti omjera hladne i tople struje, bpr . Graf je napravljen u programu *Matlab* kombiniranjem jednažbi (6.9) i (6.10), izraza $v = V_1/V_4$ te pretpostavljajući da je $\eta_d = 0.9$. Tako izražena jednažba glasi:

$$\left(\frac{T_F}{T_0}\right) = (1 + bpr) \left(\sqrt{\frac{bprv^2 + \eta_d}{bpr + \eta_d}} - v \right). \quad (6.15)$$

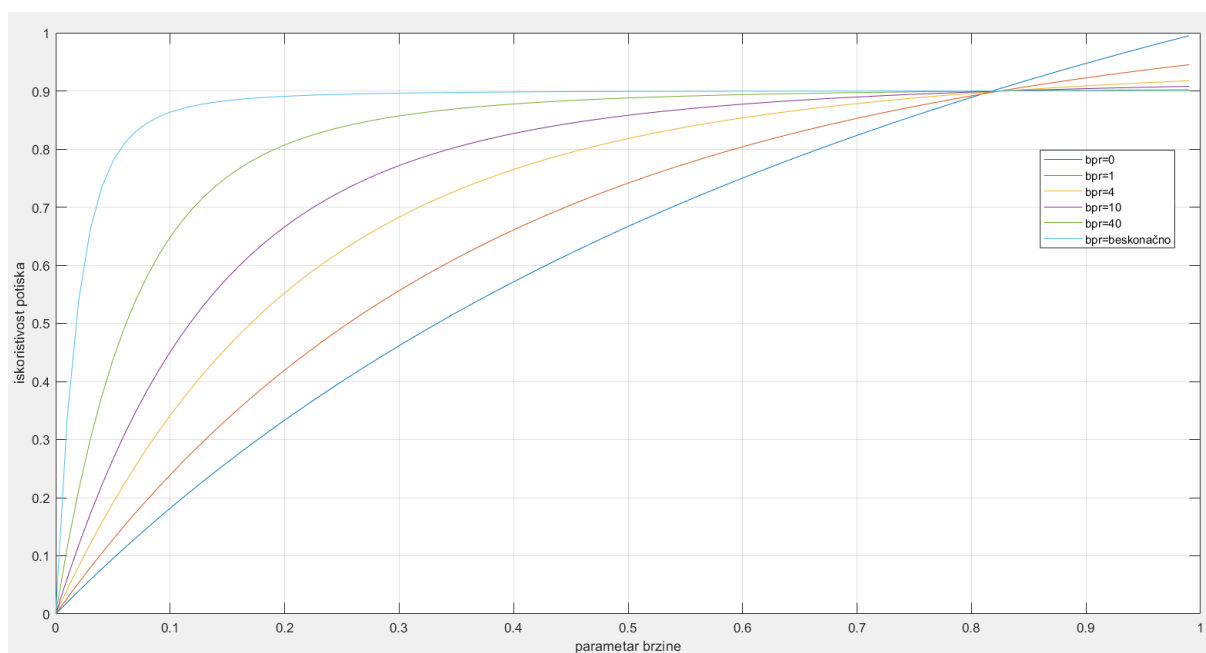
Iz grafa je vidljivo da potisak ventilatorskog dijela motora pada porastom parametra brzine, a strmiji nagib pri padu imaju krivulje s većim bpr -om.



Slika 17. Graf ovisnosti potiska ventilatorskog dijela motora o parametru brzine v za različite bpr -ove, Izvor: vlastita izrada

Slika 18. prikazuje graf ovisnosti iskoristivosti potiska o parametru brzine za različite vrijednosti bpr -a, također rađen u programu *Matlab*. Krajnja jednažba za dobivanje krivulja grafa nastala je kombinacijom jednažbi (6.1), (6.6) i (6.10). Ta jednažba glasi:

$$\eta_p = \frac{2v(1 + bpr) \left(\sqrt{\frac{bprv^2 + \eta_d}{bpr + \eta_d}} - v \right)}{1 - v^2} \quad (6.16)$$



Slika 18. Graf ovisnosti iskoristivosti potiska o parametru brzine v za različite bpr -ove, Izvor: vlastita izrada

7. ZAKLJUČAK

Konstruiranje turboventilatorskog motora započinje odabirom omjera tlakova ventilatora, *fpr*-a, čijom su vrijednošću određeni maseni protok zaobilaznog voda te *bypass* omjer. Kako je preporučljivo da brzina mlaza jezgre uvijek bude približno jednaka brzini strujanja u zaobilaznom vodu, time je ujedno određena snaga po jedinici masenog protoka niskotlačne turbine. Optimalni omjer brzine zaobilaznog voda naspram brzine jezgre za minimalnu potrošnju goriva, *sfc*, iznosi 0.92, ali je valjano pretpostaviti jednake vrijednosti brzina jer greška napravljena tom pretpostavkom iznosi manje od 0.1% neto potiska ili *sfc*-a.

Kako se omjer tlakova ventilatora smanjuje, tako raste pogonska učinkovitost dok specifična potrošnja goriva motora pada. Precizni optimalni *fpr* ovisi o znanju i podacima koji su dostupni tvrtkama za proizvodnju motora zrakoplova.

Minimiziranje buke ima velik utjecaj na izbor parametara pri konstruiranju motora velikih zrakoplova. Smanjenje buke postiže se niskom brzinom mlaza što zahtjeva nizak *fpr*. Ovo može dovesti do toga da zrakoplovi ne budu optimirani za učinkovito izgaranje goriva ili domet, a krajnja granica veličine ventilatora može biti posljedica logističkih razloga nevezanih za performanse zrakoplova.

Još je uobičajeno koristiti omjer protoka hladne i tople struje, *bypass* omjer, kako bi se opisao motor. To daje dobar uvid kako će motor izgledati, obzirom da su veličina jezgre i ventilatora otprilike proporcionalne masenom protoku kroz njih. Međutim, kad se radi o iskoristivosti potiska, *sfc*-u ili stvaranju buke, *bypass* omjer je manjkav. To je rezultat povećanja ukupnog omjera tlakova na ventilatoru i ulazne temperature turbine novih motora te jezgra daje više energije za isti maseni protok.

Dodatno, za opisivanje performansa motora (iskoristivosti potiska, *sfc*-a i buke) koristi se specifični potisak koji predstavlja neto potisak po jedinici masenog protoka kroz motor, što je jednako razlici prosječne brzine mlaza i brzine leta. Motor se svime navedenim u ovom radu može smatrati definiranim po pitanju veličine, tlačnog omjera, *bypass* omjera i specifičnog potiska.

LITERATURA

- [1] Cumpsty N., Heyes A.: Jet Propulsion, Cambridge University Press, 2015.
- [2] Jasak H.: Mlazni motori 1, Zagreb, 2013./2014.
- [3] Hünecke K.: Jet Engines Fundamentals of Theory, Design and Operation, Motorbooks International Publishers & Wholesalers, 1997.
- [4] <https://aerocorner.com/blog/turbojet-vs-turbofan/>, zadnji pristup: 20.2.2025.
- [5] <https://opensiuc.lib.siu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1009&context=jasa>, zadnji pristup: 20.2.2025.
- [6] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037604212100097X>, zadnji pristup: 20.2.2025.
- [7] <https://www.gauss-centre.eu/results/computational-and-scientific-engineering/reducing-jet-noise-with-chevron-nozzles>, zadnji pristup: 19.2.2025.
- [8] <https://www.mtu.de/engines/commercial-aircraft-engines/widebody-jets/genx/>, zadnji pristup: 18.2.2025.
- [9] <https://www.boeing.com/commercial/747-8/design-highlights>, zadnji pristup: 18.2.2025.
- [10] <https://www.airdatanews.com/what-engines-are-used-by-the-airbus-a380/>, zadnji pristup: 18.2.2025.
- [11] <https://pilotinstitute.com/turbofan-vs-turbojet/>, zadnji pristup: 18.2.2025.
- [12] https://www.researchgate.net/figure/Development-of-Turbofan-Engine-Bypass-Ratio-Ballal-and-Zelina-2003_fig4_306082636, zadnji pristup: 18.2.2025.
- [13] <https://www.prattwhitney.com/en/products/commercial-engines/jt8d>, zadnji pristup: 18.2.2025.
- [14] <https://www.flickr.com/photos/88160313@N03/8371372280/>, zadnji pristup: 18.2.2025.
- [15] <https://www.williammaloney.com/Aviation/AirMobilityCommandMuseum/AircraftEngines/pages/01C5GalaxyTurbofan.htm>, zadnji pristup: 18.2.2025.
- [16] <https://www.prattwhitney.com/en/products/commercial-engines/jt9d>, zadnji pristup: 18.2.2025.
- [17] <https://www.cfmaeroengines.com/engines/cfm56/>, zadnji pristup: 18.2.2025.
- [18] <https://www.rolls-royce.com/products-and-services/civil-aerospace/widebody/trent-900.aspx#section-related-stories>, zadnji pristup: 18.2.2025.
- [19] <https://enginealliance.com/gp7200/>, zadnji pristup: 18.2.2025.
- [20] https://books.google.hr/books?id=5vA_5XK33sC&pg=PA485&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false, zadnji pristup: 19.2.2025.

[21] <https://www.heritageconcorde.com/concorde-olympus-593-mk610-engines>, zadnji

pristup: 19.2.2025.

PRILOZI**I. Kod za računanje ovisnosti *bpr*-a i omjera tlakova niskotlačne turbine o *fpr*-u u programu*****Matlab***

```
fpr=[1.3 1.4 1.5 1.6 1.8];
bpr=[18 13.8 11.2 9.4 7.28];
LP_tpr=[11.35 10.94 10.57 10.23 9.64];
p1=polyfit(fpr, bpr, 4);
v1=polyval(p1,fpr);
p2=polyfit(fpr, LP_tpr, 4);
v2=polyval(p2,fpr);
```

```
figure
plot(fpr, bpr)
hold on
plot(fpr,v1)
hold on
plot(fpr, LP_tpr, '--')
hold on
plot(fpr,v2, '--')
xlim([1.3 1.8])
ylim([0 20])
grid on
```

```
xlabel('omjer tlakova ventilatora fpr')
```

II. Kod za računanje ovisnosti bruto i neto potiska o *fpr*-u u programu *Matlab*

```
fpr=[1.3 1.4 1.5 1.6 1.8];
bruto_potisak=[5.77 4.77 4.14 3.71 3.14];
neto_potisak=[1.409 1.355 1.322 1.293 1.236];
p1=polyfit(fpr,bruto_potisak,4);
v1=polyval(p1,fpr);
p2=polyfit(fpr, neto_potisak,4);
v2=polyval(p2, fpr);
```

```
figure
plot(fpr, bruto_potisak, '--')
hold on
plot(fpr, v1, '--')
hold on
plot(fpr, neto_potisak)
hold on
plot(fpr, v2)
grid on
xlabel('omjer tlakova ventilatora fpr')
xlim([1.3 1.8])
ylim([0.0 7.0])
```


III. Kod za računanje ovisnosti *sfc*-a i specifičnog potiska o *bpr*-u u programu

Matlab

```
fpr=[1.3 1.4 1.5 1.6 1.8];
sfc=[118.2 121.8 124.9 127.7 133];
sp_potisak=[73.6 91.8 108.6 123.9 150.6];
p1=polyfit(fpr, sfc, 4);
v1=polyval(p1,fpr);
p2=polyfit(fpr, sp_potisak, 4);
v2=polyval(p2,fpr);

figure
plot(fpr, sfc)
hold on
plot(fpr, v1)
hold on
plot(fpr, sp_potisak, '--')
hold on
plot(fpr, v2, '--')
grid on
ylim([50 160])
xlabel('omjer tlakova ventilatora fpr')
```

IV. Kod za računanje ovisnosti potiska ventilatorskog dijela o parametru brzine u programu

Matlab

```
par_brz=[0:0.01:1];
bpr_0=0;
bpr_1=1;
bpr_2=4;
bpr_3=10;
bpr_4=40
bpr_5=500; %500 za beskonačno
eta_d=0.9;
for i=1:length(par_brz)

potisak_0(i)=(1+bpr_0)*(sqrt((bpr_0*par_brz(i)^2+eta_d)/(bpr_0+eta_d))-par_brz(i))

potisak_1(i)=(1+bpr_1)*(sqrt((bpr_1*par_brz(i)^2+eta_d)/(bpr_1+eta_d))-par_brz(i))

potisak_2(i)=(1+bpr_2)*(sqrt((bpr_2*par_brz(i)^2+eta_d)/(bpr_2+eta_d))-par_brz(i))

potisak_3(i)=(1+bpr_3)*(sqrt((bpr_3*par_brz(i)^2+eta_d)/(bpr_3+eta_d))-par_brz(i))

potisak_4(i)=(1+bpr_4)*(sqrt((bpr_4*par_brz(i)^2+eta_d)/(bpr_4+eta_d))-par_brz(i))
```

```

potisak_5(i)=(1+bpr_5)*(sqrt((bpr_5*par_brz(i)^2+eta_d)/(bpr_5+eta_d))-par_brz(i))
end

figure
plot(par_brz,potisak_0)
hold on
plot(par_brz,potisak_1)
hold on
plot(par_brz,potisak_2)
hold on
plot(par_brz,potisak_3)
hold on
plot(par_brz,potisak_4)
hold on
plot(par_brz,potisak_5,'--')
xlabel('parametar brzine')
ylabel('potisak ventilatorskog dijela motora')
legend('bpr=0','bpr=1','bpr=4','bpr=10','bpr=40','bpr=beskonaèno')
ylim([0 4])
grid on

```

V. Kod za računanje ovisnosti iskoristivosti potiska o parametru brzine u programu

Matlab

```

par_brz=[0:0.01:1];
bpr_0=0;
bpr_1=1;
bpr_2=4;
bpr_3=10;
bpr_4=40;
bpr_5=500; %500 umjesto beskonaèno
eta_d=0.9;
for i=1:length(par_brz)

ni_p0(i)=2*par_brz(i)*(1+bpr_0)*(sqrt((bpr_0*par_brz(i)^2+eta_d)/(bpr_0+eta_d))-par_brz(i))/(1-par_brz(i)^2)

ni_p1(i)=2*par_brz(i)*(1+bpr_1)*(sqrt((bpr_1*par_brz(i)^2+eta_d)/(bpr_1+eta_d))-par_brz(i))/(1-par_brz(i)^2)

ni_p2(i)=2*par_brz(i)*(1+bpr_2)*(sqrt((bpr_2*par_brz(i)^2+eta_d)/(bpr_2+eta_d))-par_brz(i))/(1-par_brz(i)^2)

ni_p3(i)=2*par_brz(i)*(1+bpr_3)*(sqrt((bpr_3*par_brz(i)^2+eta_d)/(bpr_3+eta_d))-par_brz(i))/(1-par_brz(i)^2)

ni_p4(i)=2*par_brz(i)*(1+bpr_4)*(sqrt((bpr_4*par_brz(i)^2+eta_d)/(bpr_4+eta_d))-par_brz(i))/(1-par_brz(i)^2)

```

```
ni_p5(i)=2*par_brz(i)*(1+bpr_5)*(sqrt((bpr_5*par_brz(i)^2+eta_
d)/(bpr_5+eta_d))-par_brz(i))/(1-par_brz(i)^2)
end
```

```
figure
plot(par_brz,ni_p0)
hold on
plot(par_brz,ni_p1)
hold on
plot(par_brz,ni_p2)
hold on
plot(par_brz,ni_p3)
hold on
plot(par_brz,ni_p4)
hold on
plot(par_brz,ni_p5)
xlabel('parametar brzine')
ylabel('iskoristivost potiska')
legend('bpr=0','bpr=1','bpr=4','bpr=10','bpr=40','bpr=beskonaè
no')
ylim([0 1])
grid on
```