

# Pogonski sustav aviona Boeing 787 i GEnX motor

---

**Magaš, Mihovil**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:944920>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-15**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**POGONSKI SUSTAV AVIONA BOEING 787 I GENX MOTOR**

Rijeka, svibanj 2024.

Mihovil Magaš  
0069084775

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**POGONSKI SUSTAV AVIONA BOEING 787 I GENX MOTOR**

Mentor: Prof. dr. sc. Tomislav Senčić

Rijeka, svibanj 2024.

Mihovil Magaš  
0069084775

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam završni rad po imenom "Pogonski sustav aviona Boeing 787 i GEnX motor" samostalno izradio u skladu s dodijeljenim zadatkom pod vodstvom prof.dr.sc Tomislava Senčića. U radu sam primjenio znanja stečena tijekom naobrazbe te metodologiju istraživačkog rada kojemu mi je koristila literatura navedena na kraju završnog rada.

Mihovil Magaš

## **ZAHVALA**

Veliku zahvalu dugujem svojem mentoru prof.dr.sc. Tomislavu Senčiću na strpljenju i pruženoj pomoći pri izradi ovog završnog rada. Zahvalio bih se svim svojim prijateljima te kolegama s fakulteta na potpori i pomoći tijekom ovog studiranja, tako i svojim roditeljima i obitelji koji su mi omogućili ovo obrazovanje te uvijek bili podrška.

Posebna zahvala ide i svim mojim kolegama i zrakoplovnima stručnjacima iz Aviation Training Services-a na potpori i stručnim savjetima.

## Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. MLAZNI MOTORI .....	2
2.1. Povijest mlaznih motora .....	2
2.2. Princip rada .....	3
2.3. Vrste mlaznih motora.....	4
2.3.1. Turbo-mlazni motori.....	4
2.3.2. Turbo-ventilatorski motori.....	4
2.3.3. Turbo-propelerni motori .....	5
2.3.4. Turbo-osovinski motori .....	6
2.4. Dijelovi mlaznog motora (GENx-1B) .....	7
2.4.1. Ventilator .....	7
2.4.2. Kompresor.....	8
2.4.3. Komora izgaranja.....	9
2.4.4. Turbina.....	9
3. NAPREDAK BOEINGA 787 I GENX .....	11
3.1. Revolucionarni mlazni motor GENx .....	11
3.1.1.1. Bypass ratio.....	11
3.1.1.2. Lopatice turbine .....	12
3.1.1.3. TAPS mlaznice za gorivo .....	13
3.1.1.4. Električna ventilacija .....	13
3.1.1.5. Potpuno električno upravljanje .....	14
3.1.1.6. Chevrons (ozubljeni rubovi) .....	15
3.2. Boeing 787 .....	15
3.2.1.1. Prvi zrakoplov kompozitne strukture.....	16
3.2.1.2. Udobnost putnika .....	17
3.2.1.3. Električni sustav.....	18

4.	SHEMA ELEKTRIČNOG SUSTAVA BOEINGA 787 .....	22
5.	PRORAČUNI .....	24
5.1.	Termodinamički proračun motora .....	24
5.2.	Proračun naprezanja lopatica turbine .....	27
6.	MODEL MLAZNICE ZA GORIVO GENX MOTORA .....	29
7.	ZAKLJUČAK .....	31
8.	LITERATURA .....	32
9.	POPIS SLIKA .....	33
10.	POPIS OZNAKA I KRATICA .....	34
11.	SAŽETAK .....	35

## 1. UVOD

U ovom radu analizirati će se pogonski sustav aviona Boeinga 787 i GEnx motor, koji je ostvario razne rekorde zahvaljujući inovativnom pogonskom sustavu, te ga usporediti s ranijim tehnologijama kako bi razumijeli u potpunosti njegova dostignuća te razloge za unaprijeđenjem. Prvo će se pojasniti princip rada plinske turbine, vrste plinskih turbina te njene dijelove namijenene u zrakoplovstvu. Napraviti ćemo termodinamički proračun motora te izračunati naprežanja na lopaticama ventilatora. Izraditi električnu shemu zrakoplova te prikazati sklopne nacрте motora i model sapnice za gorivo.



## 2. MLAZNI MOTORI

### 2.1. Povijest mlaznih motora

U ranim godinama zrakoplovstva, razvoj aviona i motora najviše potiče vojska te je komercijalna upotreba stavljena u drugi plan. Začetnike mlaznog motora možemo nazvati engleskog inženjera i pilota Franka Whittlea i njemačkog znanstvenika Hansa von Ohaina.

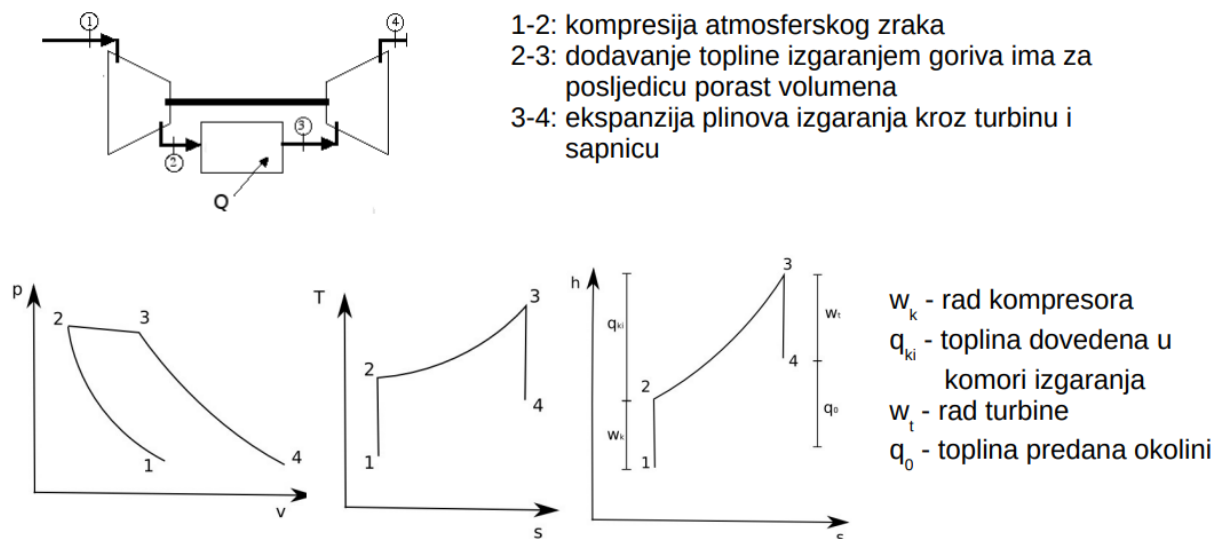
Whittle je 1930. objavio svoj prvi patent, turbo-mlazni motor kod kojeg dvostupanjski aksijalni kompresor opskrbljuje jednostrani centrifugalni kompresor. Tek 1937. njegov prvi motor je pokrenut pogonjen tekućim gorivom. Problem je bilo gorivo koje nije uspjelo izgorjeti te bi nastavilo izgarati i nakon gašenja pumpe. S druge strane, njemački fizičar Hans von Ohain, podržan od strane Ernsta Heinkela, također je radio na mlaznom motoru ne znajući za Whittle-ov rad. Von Ohainov motor je bio pogonjen mješavinom goriva i zraka ali je stlačeni zrak dovođen iz vanjskog izvora pa motor nije mogao raditi samostalno. Udruživanjem snaga von Ohaina i Heinkela nastao je prvi eksperimentalni avion na mlazni pogon nazvan Heinkel He 178. Kako je Drugi svjetski rat počeo bjesniti u Europi, Anselm Franz nastavio je Heinkelov rad te s tvrtkom Messerschmit proizveo Me 262. Taj avion je bio najnapredniji avion u ratu, ali zbog prevelike potrošnje goriva većinu vremena je proveo na zemlji. Nakon završetka rata 1948. godine američka tvrtka Pratt&Whitney rješila je taj problem spajajući dva motora u jedan. Njihov motor se sastojao od dva kompresora koji su se vrtjeli neovisno jedan o drugom, a unutrašnji je omogućavao visoku kompresiju za dobru učinkovitost. Svaki kompresor je uzimao snagu iz vlastite turbine, tako da smo imali i dvije turbine jednu iza druge. Tako je nastao motor J-57 koji je pogonio komercijalne zrakoplove poput Boeinga 707 i Douglasa DC-8. [1]



*Slika 1 Heinkel He 178 [1]*

## 2.2. Princip rada

Princip rada mlaznih motora zasniva se na trećem Newtonovom zakonu koji kaže da svaka akcija ima reakciju. Osnovno načelo svih mlaznih motora je da se zrak dovodi pod tlakom u komoru izgaranja, gdje se mješa s gorivom te se izgaranjem stvara još veći tlak koji tjera plinove iz komore izgaranja velikom brzinom kroz mlaznic stvarajući time potisak. Kod mlaznih motora s turbinom, zrak ulazi u rotirajući kompresor kroz usisnik zraka. U kompresoru se zrak komprimira prije ulaska u komore izgaranja gdje se pod tlakom miješa s gorivom. Proces izgaranja dovodi do velikog porasta temperature te vrući plinovi stvoreni gorenjem velikom brzinom prolaze kroz turbinu i okreću je, zatim kroz ispušnu cijev izlaze iz motora. Turbina pogoni kompresor s kojim je spojena preko osovine. Efikasnost mlaznog motora najviše ovisi o omjeru ulaznog tlaka u kompresor i komprimiranog zraka prije ulaska u komore izgaranja te ulazne temperature na turbinu. S termodinamičkog stajališta rad mlaznih motora zasniva se na Jouleov-om (Brayton) ciklusu koji se sastoji od 2 adijabate (kompresija,ekspanzija) te 2 izobare (dovođenje i odvođenje topline). Proces, kao prikazan na slici, kreće u točkama 1-2 kompresijom atmosferskog tlaka, zatim u točkam 3-4 dodajemo toplinu izgaranjem goriva te time dolazi do porasta volumena i na kraju u točkam 3-4 imamo ekspanziju plinova izgaranja kroz turbinu i sapnicu. Na slici 2 imamo prikaz sheme rada te p-v, T-s i h-s dijagrame. [2]

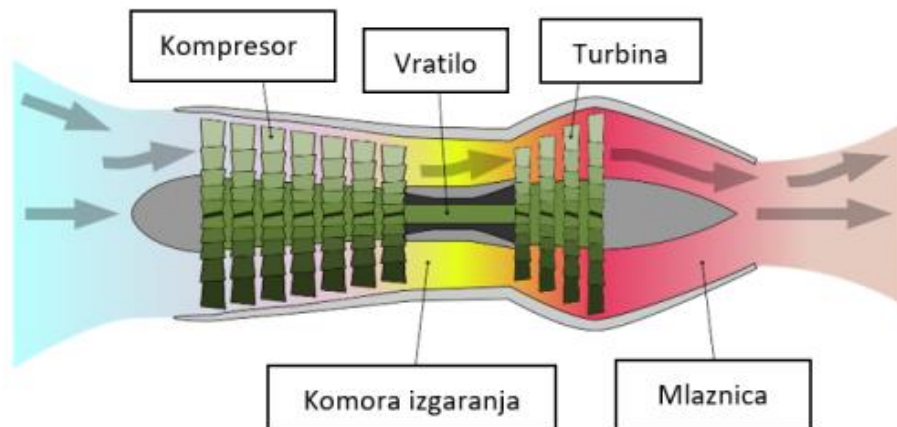


Slika 2 Princip rada mlaznih motora [2]

## 2.3. Vrste mlaznih motora

### 2.3.1. Turbo-mlazni motori

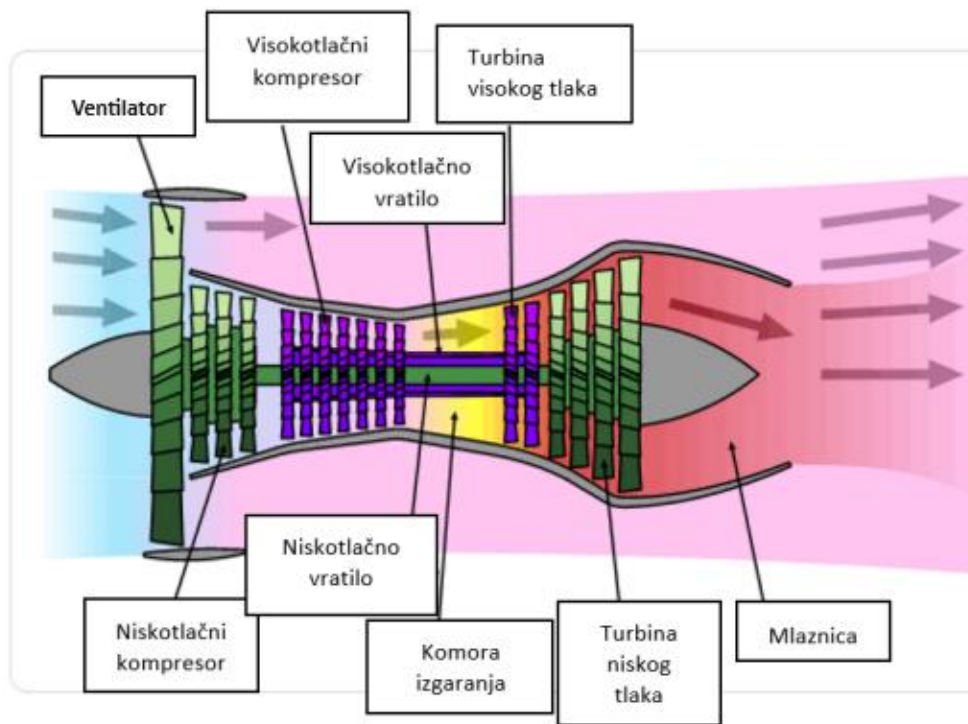
Kod turbo-mlaznih motora sav zrak koji ulazi kroz usisnik ulazi u kompresor gdje se stlačuje te onda ulazi u komoru izgaranja. U komori izgaranja se stlačeni zrak miješa s gorivom i zapaljuje. Plinovi koji izlaze iz komore izgaranja pokreću turbinu koja preko osovine rotira kompresor. Svi plinovi se istiskuju kroz mlaznicu i stvaraju potisak. [2]



Slika 3 Turbo-mlazni motor [2]

### 2.3.2. Turbo-ventilatorski motori

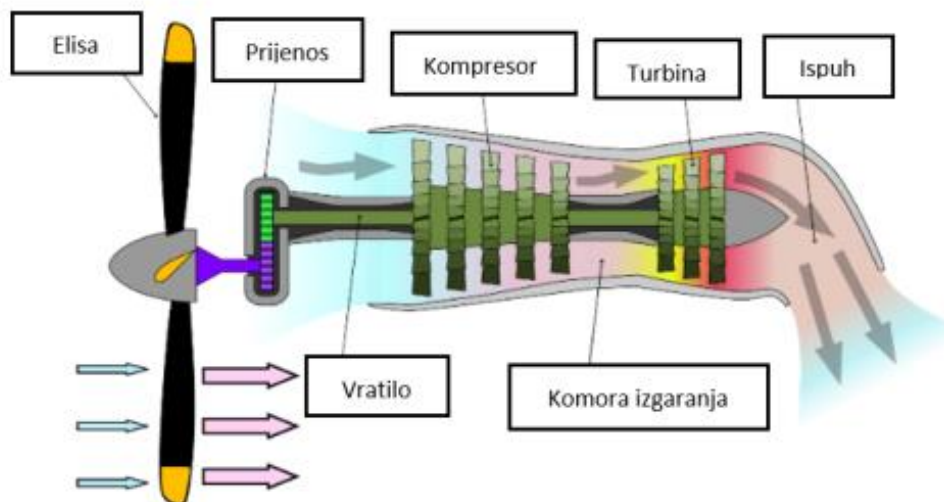
Za razliku od turbo-mlaznih motora kod turbo-ventilatorskih motora dio zraka ulazi u kompresor, a drugi dio obilazi jezgru motora. Zaobilazeći ili "bypass" zrak odlazi u atmosferu ili ulazi u prostor iza turbine miješajući se s ispušnim plinovima prije ulaska u mlaznice. Današnji turbo-ventilatorski motori, poput GENx, imaju nisku vrijednost specifičnog potiska, to jest stvorenog potiska podijeljenog ulaznim strujanjem zraka što čini motor dosta tišim i efikasnijim. Postoji i omjer ulaznog zraka koji nazivamo "bypass" omjer kojim prikazujemo omjer količine zraka koji prolazi kroz jezgru motora te količine zraka koji zaobilazi jezgru. Iznosi od 4:1 do 8:1 smatraju se velikim, a GENx ima omjer od čak 9.2:1.



Slika 4 Turbo-ventilatorski motor [2]

### 2.3.3. Turbo-propelerni motori

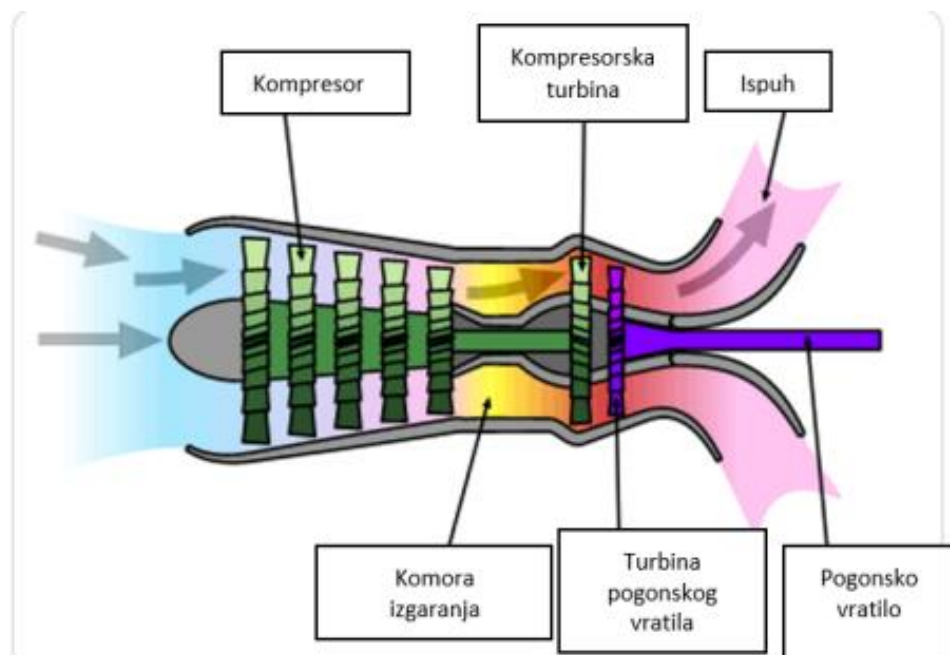
Turbo-propelerni motori većinu energije ispušnih plinova koriste za pokretanje turbine koja preko osovine direktno ili preko zupčanika pokreće propeler. Sila potiska koju ispuhom stvaraju ti motori neznatna je. Ovakvi motori troše manje goriva ali se postavljaju samo na manje putničke i teretne zrakoplove jer su efikasniji pri nižim brzinama.



Slika 5 Turbo-propelerni motor [2]

#### 2.3.4. Turbo-osovinski motori

Kod turbo-osovinski motora gotova sva energija predaje se vratilu.. Razlika je isto u prijenosniku sila koji je zapravo sastavni dio zrakoplova, a ne motora. Ovakvi motori se najčešće koriste kod helikoptera i brodova kod kojih pogonska osovnik motora preko zupčanika pokreće rotor.



Slika 6 Turbo-osovinski motor [2]

## 2.4. Dijelovi mlaznog motora (GEnx-1B)

U ovom dijelu opisati ćemo dijelove mlaznih motora, ali ćemo ih prikazati pomoću dijelova GEnx-1B motora. [3]

### 2.4.1. Ventilator

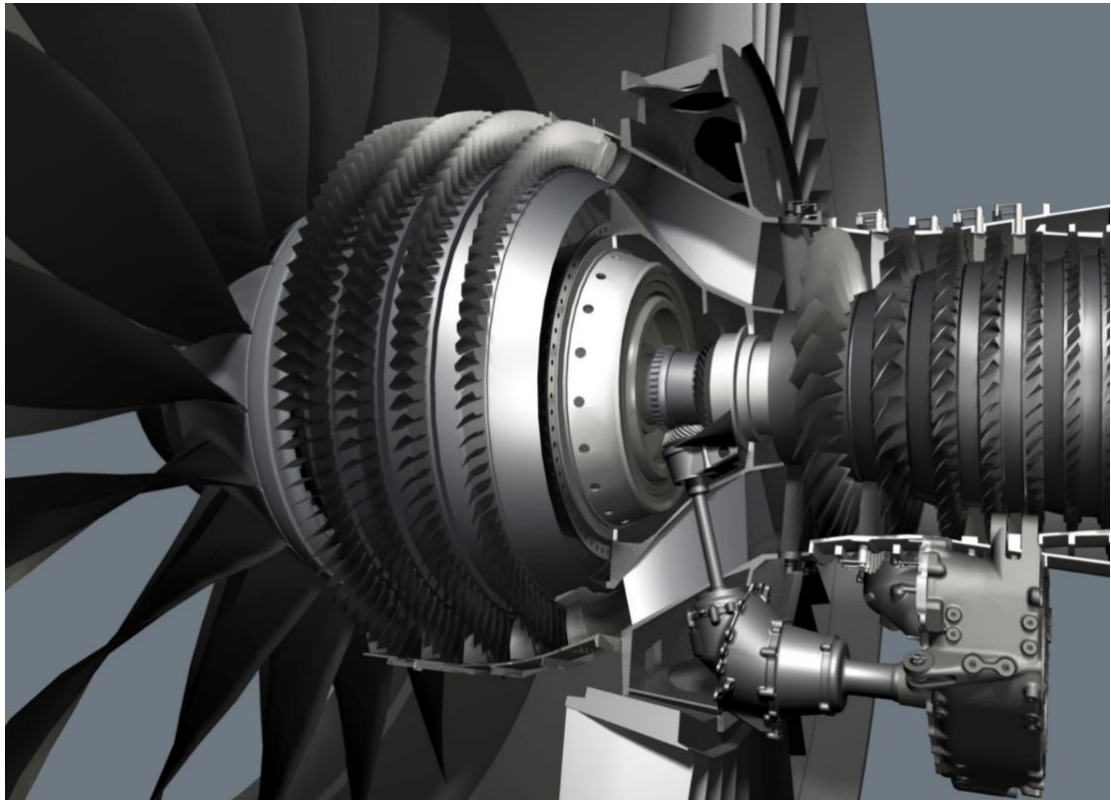
Sve počinje sa ventilatorom koji je kod GEnx motora sastavljen od 18 lopatica. Lopatice su napravljene od karbonskih vlakana te su zbog toga dosta lakše od svojih prethodnika i zbog toga je omogućeno stavljanje manjeg broja lopatica što rezultira boljom iskoristivošću. Pošto su lopatice prvi dio motora koji je na udaru svega one su ojačane titanijskim rubovima. Glavna funkcija ventilatora je usisavanje i usmjeravanje zraka u motor. Ventilator razdvaja zrak na primarni i sekundarni gdje pod primarnim zrakom podrazumijevamo zrak koji prolazi kroz jezgru motora, a sekundarni zrak onaj zrak koji zaobilazi jezgru.



Slika 7 Ventilator [3]

### 2.4.2. Kompresor

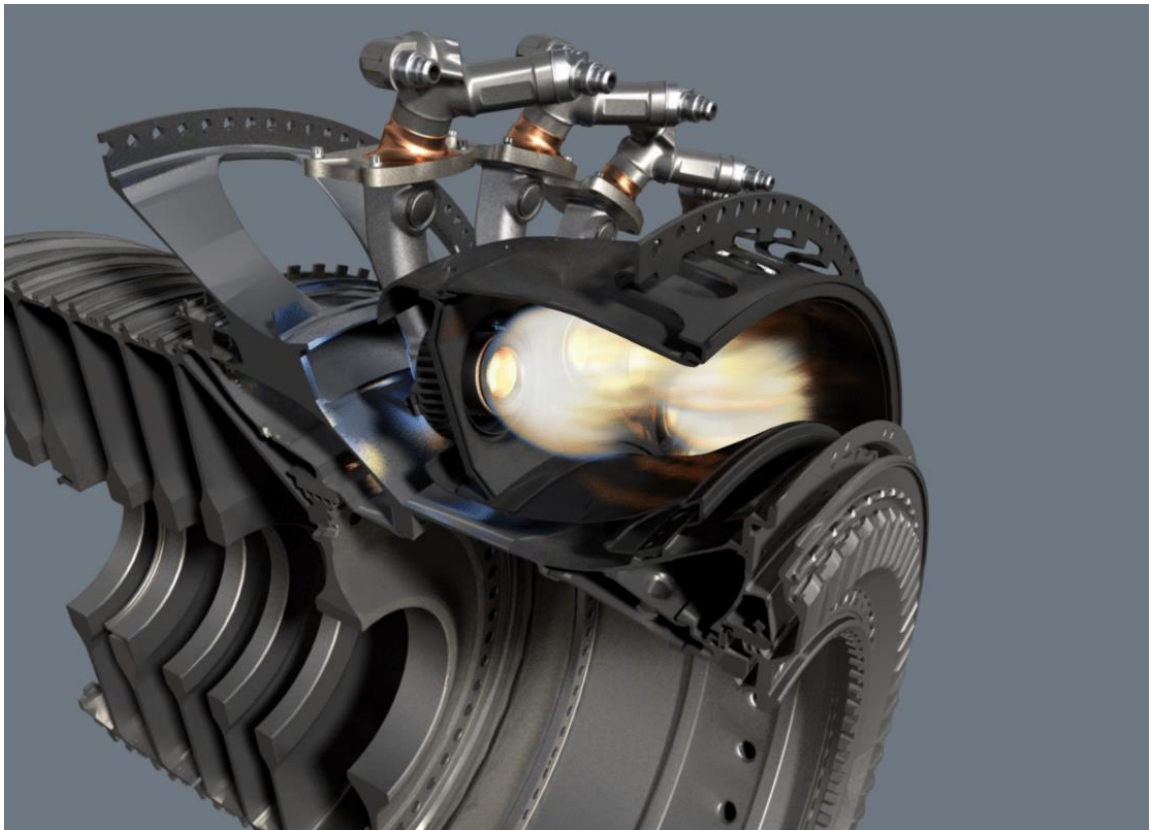
Kod GEnx motora kompresor se dijeli na dva dijela. Na 4-stupanjski nisko-tlačni kompresor, s 4 rotorske rešetke i 5 statorskih rešetki, te na 10-stupanjski visoko-tlačni kompresor, s 3 diska i 7 rotora. Glavna funkcija kompresora je da stlači zrak koji će se dalje miješati s gorivo i zapaliti. Kod aksijalnog kompresora rotor se okreće velikom brzinom a zrak se ubrzava rotorskim lopaticama prema statorskim lopaticama. Energija se s rotorskih lopatica prenosi na kinetičku energiju zraka koja ubrava. Kinetička energija se u statorskim kanalima pretvara u porast tlaka. Statorske lopatice također mijenjaju smjer strujanja kako bi se postiglo ispravno nastrujavanje rotorskih lopatica sljedećeg stupnja. Prema višim stupnjevima lopatice su sve manje a kanal uži jer je gustoća zraka sve veća. Isto tako raste i temperatura.



*Slika 8 Nisko-tlačni i visoko-tlačni kompresori [3]*

### 2.4.3. Komora izgaranja

Nakon što je zrak stlačen u kompresu on dolazi do komore izgaranja gdje se miješa s gorivom i zapaljuje. Komora izgaranja je prstenaste strukture s dvostrukom stijenkom. Sastoji se od ulaza zraka, sapnica za gorivo, rešetke za usmjeravanje ulaznog zraka, vanjske stijenke, unutarnje stijenke, otvora za zrak i izlaznog otvora, Glavni zadaci su usporavanje struje zraka, reguliranje pretička zraka, priprema smjese i miješanje, hlađenje plamena te usmjeravanje ispušnih plinova.

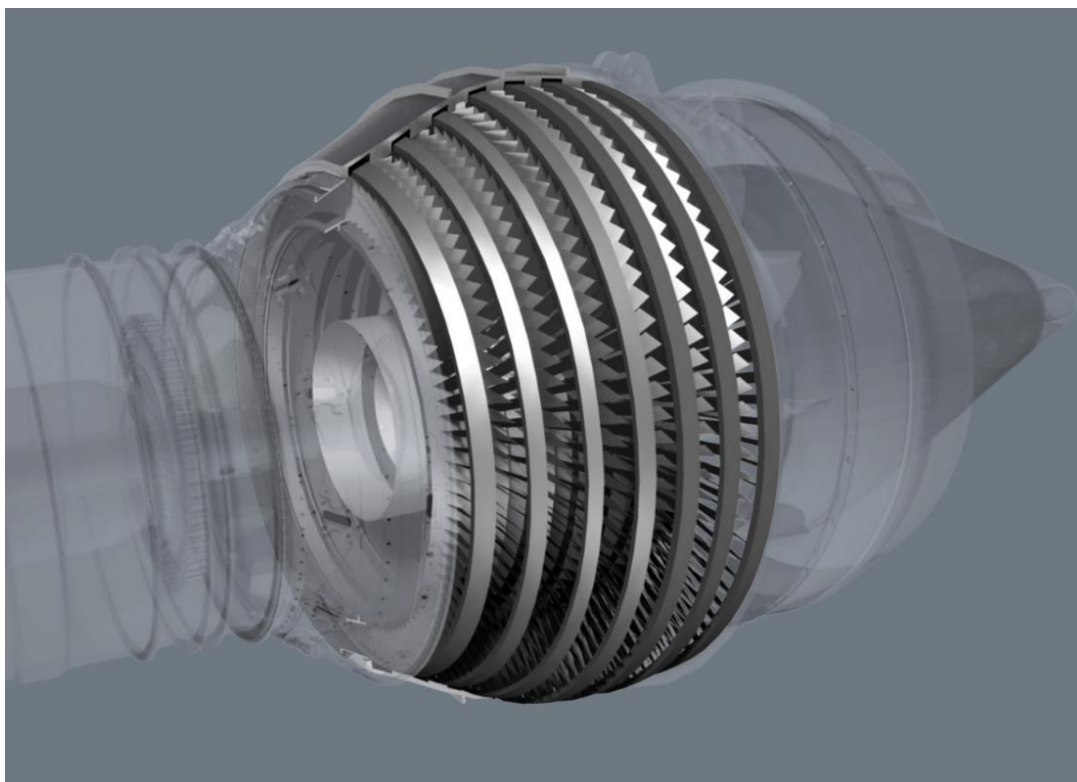


*Slika 9 Komora izgaranja [3]*

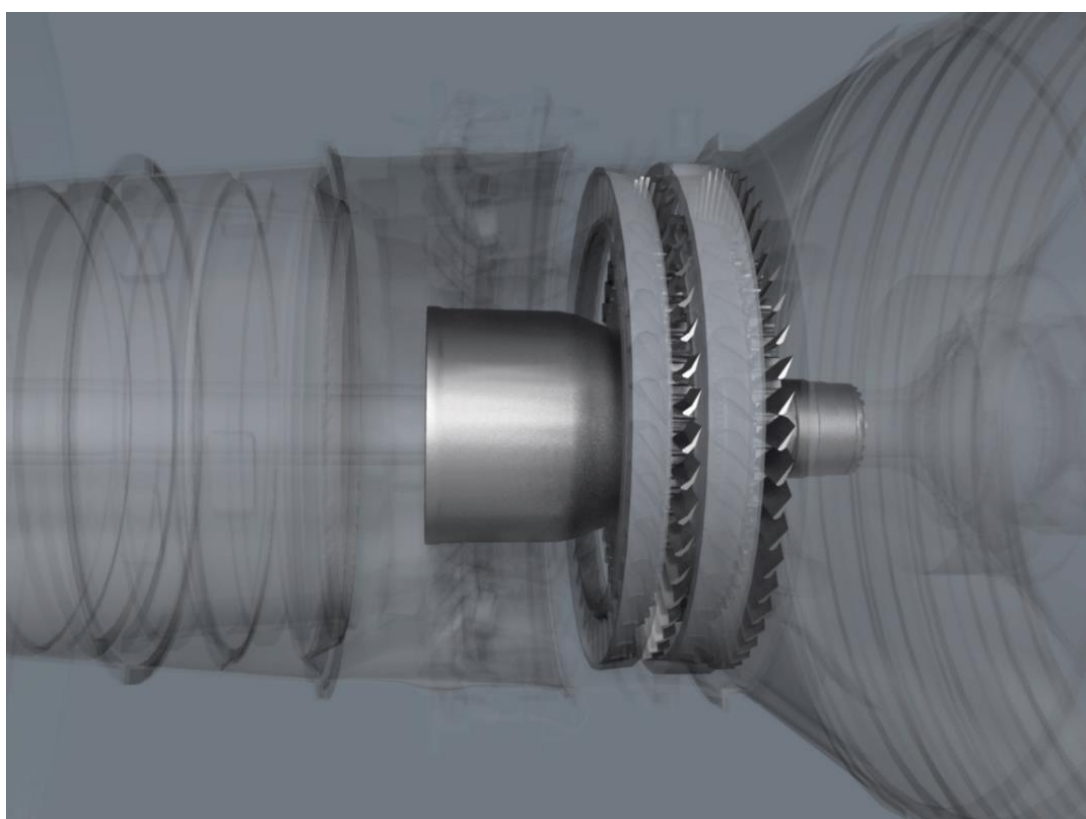
### 2.4.4. Turbina

Nakon izgaranja goriva ispušni plinovi odlaze u turbinu koja njihovu energiju pretvara u mehaničku energiju. Kod GENx turbina se dijeli na 2-stupanjsku visoko-tlačnu turbinu, koja koristi tu mehaničku energiju za pokretanje visoko-tlačnog kompresora te pomoćni pogon, i 7-stupanjsku nisko-tlačnu turbinu koja koristi tu energiju za pokretanje ventilatora i nisko-tlačnog kompresora.





*Slika 10 Nisko-tlačna turbina [3]*



*Slika 11 Visoko-tlačna turbina [3]*

### 3. NAPREDAK BOEINGA 787 I GENX

Najveći zadatak inženjera u civilnom zrakoplovstvu oduvijek je bio smanjivanje potrošnje goriva, emisije CO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub> te povećanjem udobnosti putnika. Zrakoplov Boeing 787 zajedno sa inovativnim mlaznim motorom GENx, proizveden od firme General Electric, predstavlja značajan napredak u sva tri navedena područja. U ovom odjeljku ćemo razraditi detaljnije kako su došli do toga.



*Slika 12 Boeing 787 s GENx motorima*

#### 3.1. Revolucionarni mlazni motor GENx

Motor GENx je visokoučinkoviti turbo-ventilatorski motor koji se koristi na zrakoplovima Boeing 787 u varijanti GENx-1b i na Boeingu 747-8 u varijanti GENx-2b. Stvarajući 310-330kN, ovisno o podtipu motora, GENx je postigao manju potrošnju goriva za čak 15% i 15% manje emisije CO<sub>2</sub> u odnosu na svoje prethodnike najviše zahvaljujući ventilatoru s promjerom 2.8m zbog kojeg je dostignut "bypass ratio" od čak 9.2:1, inovativnim lopaticama od karbonskih vlakana te TAPS 3d prinatnim mlaznicama za gorivo. [5]

##### 3.1.1.1. Bypass ratio

Bypass ratio je omjer protoka zraka koji prolazi oko centralnog dijela motora u odnosu na protok zraka koji prolazi kroz sam motor. Ovaj omjer se koristi kao mjera efikanosti i

performansi turboventilatorskih motora, kao što je i sam GENx. Ako uzmemo GENx-ov bypass ratio od 9.2:1 to označava da 9.2 puta više zraka prolazi oko motora nego kroz sam motor. Ovo je važno jer veći bypass ratio obično rezultira većom potisnom silom i boljom učinkovitosti motora, taj zrak služi za stvaranje potiska te uz to hladi jezgru motora. To omogućuje smanjenje potrošnje goriva i emisija, te smanjivanje razine buke. Možemo uzeti kao primjer njegovog prethodnika motor GE CF6 koji ima bypass ratio od 5:1 te 15% veću potrošnju goriva. [4]

### 3.1.1.2. Lopatice turbine

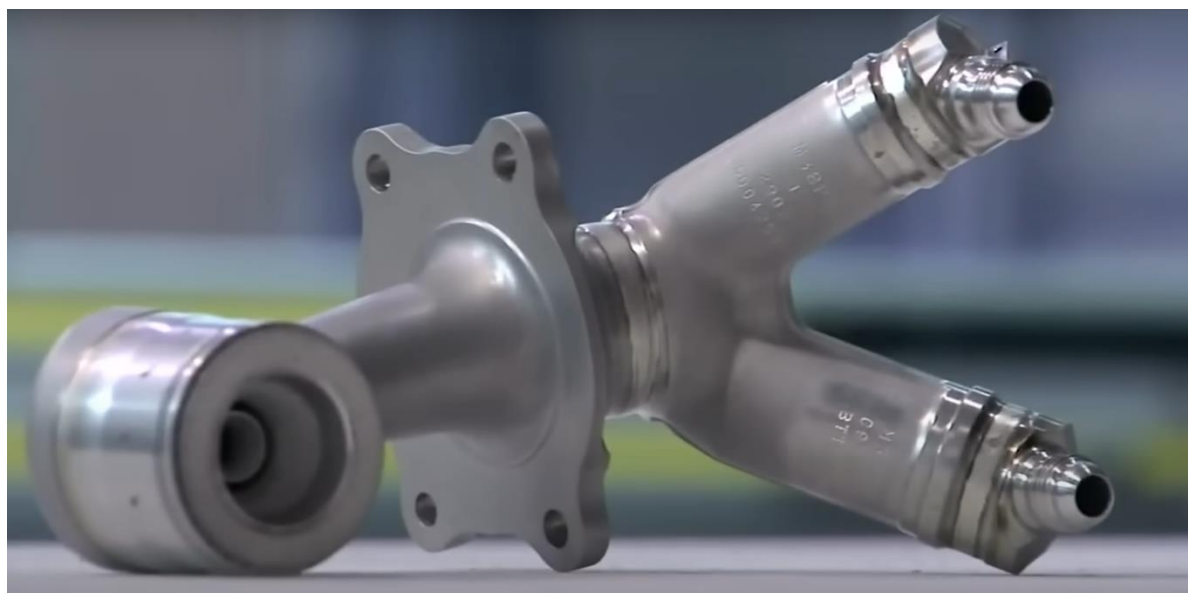
Kako bi postigli takav bypass ratio i uspješno izveli toliki promjer ventilatora bilo je potrebno riješiti problem napreznja lopaticama pri takvoj veličini jer se ventilator okreće istom brzinom kao i kompresor. Zato su inženjera iz General Electrica koristili karbonska vlakna kao materijal za lopatice čime su uštedjeli čak 15% na masi lopatica što im je ujedno dopustilo da smanje broj loaptica sa 22 na 18. Naime karbonska vlakna nemaju veliki otpor na udarac zbog čega su morali obložiti rubove titanijem kako bi sprječili ulazak stranih tijela u motor, prvotno ptica. [4]



Slika 13 Lopatice turbine GENx motora

### 3.1.1.3. TAPS mlaznice za gorivo

Kako bi smanjili emisiju štetnih tvari pri povećanom omjeru tlakova i povećali učinkovitost izgaranja goriva GENx motori koriste 22 TAPS (Twin Annular Premixing Swirler – Dvostruki prstenasti predmiješajući vrtložnik) mlaznice za gorivo. TAPS mlaznice za gorivo koriste dvije prstenaste mlaznice koje omogućuju bolju raspodjelu goriva i zraka unutar komore za izgaranje. Swirleri unutar mlaznica premještaju i miješaju gorivo i zrak kako bi se postigla optimalna mješavina prije ulaska u komoru za izgaranje. Ovo osigurava homogenu mješavinu koja poboljšava izgaranje i smanjuje stvaranje štetnih tvari poput dušikovih oksida (NOx). Zahvaljujući 3d printanju metala General Electric je uspio izraditi mlaznicu za gorivo sa kompleksnim unutrašnjim tunelom zračnih kanala. [4]



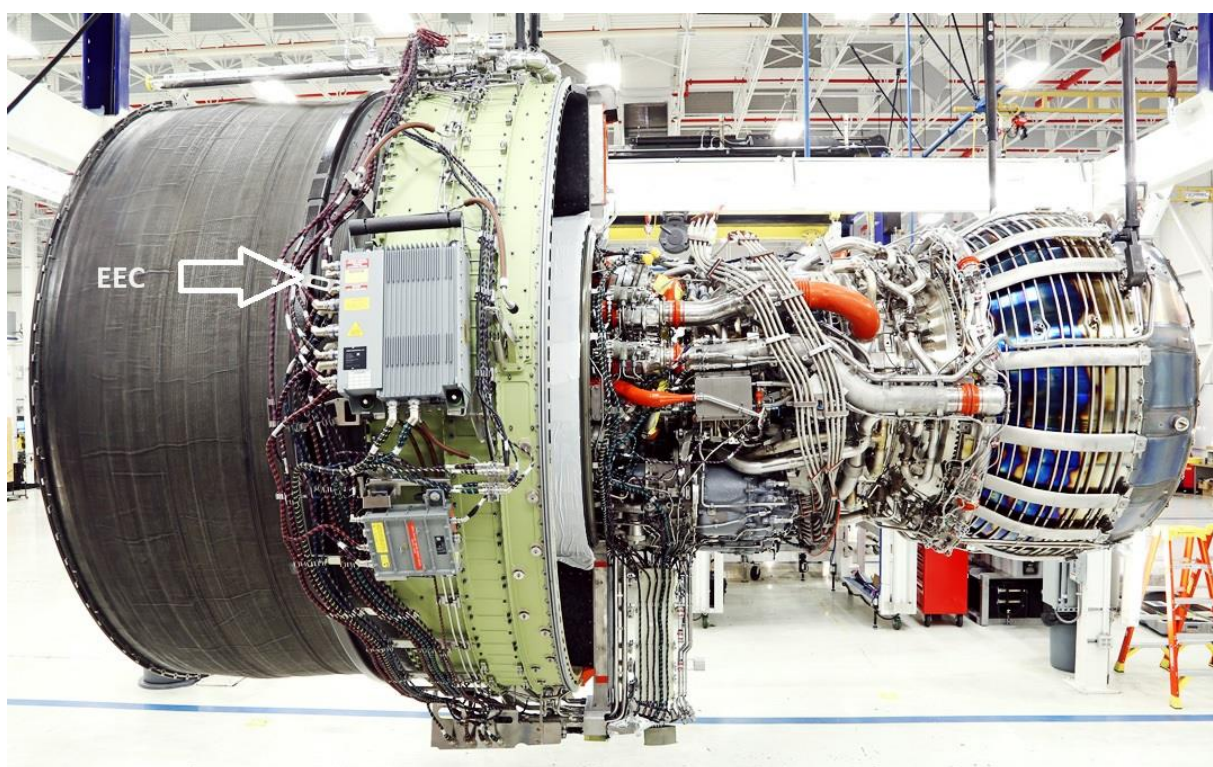
Slika 14 TAPS mlaznica za gorivo [4]

### 3.1.1.4. Električna ventilacija

Još jedan od velikih napredaka ovog zrakoplova i motora je potpunom zamjenom svih pneumatskih sustava sa električnim. Vezano za motor GENx, Boeing 787 ne koristi "bleed air" sustav za kontroliranje ventilacijskog sustava. Pod "bleed air-om" podrazumijevamo vrući zrak koji se kod prethodnika uzimao iz kompresora motora te vodio kroz različite stupnjeve hlađenja te odvodio u kabinu. Kod Boeinga 787 koristimo električni sustav ventilacije pomoću atmosferskog tlaka koji ćemo poslije dodatno objasniti. Time su inženjeri uspjeli smanjiti težinu motora te znatno povećati efikasnost motora. [4]

### 3.1.1.5. Potpuno električno upravljanje

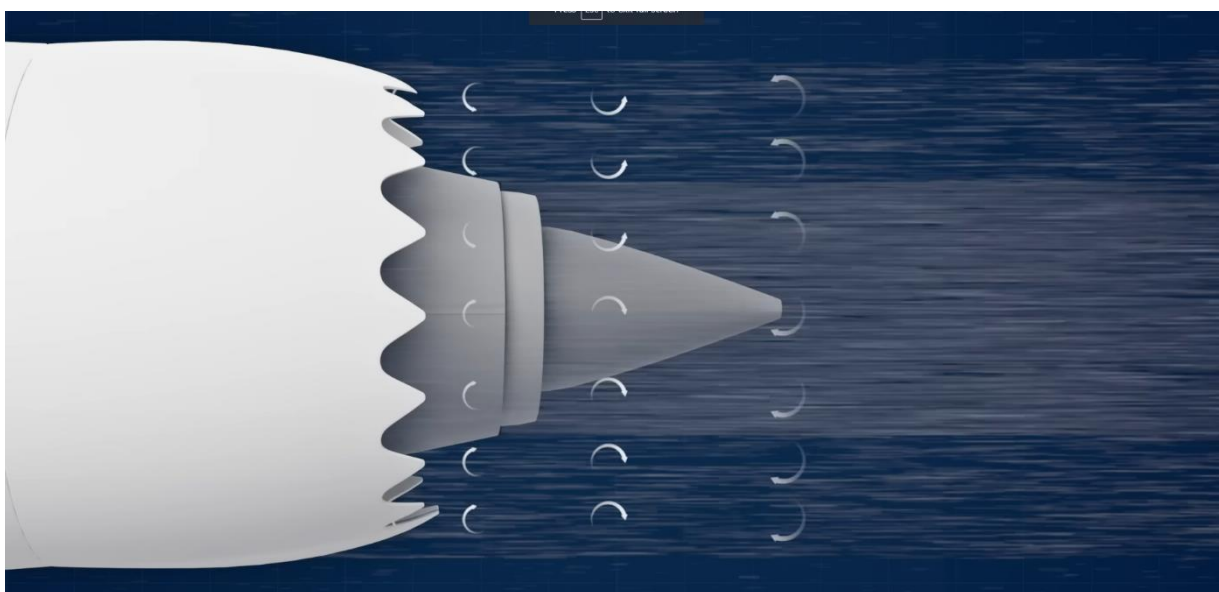
Prethodnici GENx poput starijih GE CF6-80 motora koristili su za upravljanjem sistemima goriva i ulja hidromehaničke komponente. Inženjeri General Electrica su GENx motor prepustili u ruke elektroničkog sustava FADEC (Full Authority Digital Engine Control – Digitalna kontrola motora s punim ovlastima) koji se sastoji od više komponenata i glavna uloga mu je kontroliranje protoka goriva u komoru izgaranja. Srce FADEC-a je EEC (Electronic Engine Control – Elektronička kontrola motora), dvokanalni procesor, od kojih je jedan kanal u upotrebi a drugi u pripravnosti te prima podatke iz zrakoplovnih sistema, motorovih limita te vremenskih uvjeta i pomoću njih kontrolira potisak motora i prati pojavu grešaka. Uvođenjem FADEC-a GENx je uvelike unaprijedio efikasnost potrošnje goriva i uštedio na težini mehaničkih komponenata kojima su prethodnici upravljali čime FADEC upravlja. Naime kao mana električnog upravljanja tim sustavom može se uzeti to što ne možemo manualno utjecati na odluke FADEC-a te ako dođe do njegove pogreške ili gubitka dolazi i do nepovratnog gubitka kontrole nad motorom u letu. [3]



Slika 15 EEC na GENx motoru

### 3.1.1.6. Chevrons (ozubljeni rubovi)

Gledajući na GEnx motor s vanjske strane, shvatiti ćemo da je nešto drugačije u odnosu na njegove prethodnike. Detalj koji svima upadne u oko su mali trokutići u obliku zubiju na stražnjem dijelu motora. Ti "zubi" nisu tu zbog kozmetičkog izgleda već imaju važnu ulogu u smanjivanju buke. Pri izlasku iz motora vrući zrak se sudara s hladnim atmosferskim zrakom te nastaje buka koju možemo zamisliti poput vodopada koji se sudara s vodom pri dnu te nastaje buka. Ti "zubi" su stručno nazvani chevrons i njihova uloga je stvaranje manjih vrtloga zraka, kao prikazano na slici 16, koji se mješaju s atmosferskim zrakom što je dovelo do smanjivanje buke za čak 30%. [4]



Slika 16 Regulacija protoka zraka pomoću chevrona [4]

## 3.2. Boeing 787

Zrakoplov američke tvrtke Boeing koji dolazi u varijantama B787-8, B787-9 i B787-10, koji se razlikuju u duljinama trupa kao prikazano na slici 17, je najmoderniji i najsofisticiraniji putnički zrakoplov trenutno na tržištu. U uporabu je ušao 2011. godine i od tad je proizveden u preko 1100 primjeraka. Boeing 787 troši 20% manje goriva nego njegovi prethodnici, može letjeti preko 14000km i dostiže brzinu u krstarenju od Mach 0.85 ili 903 km/h. Može prevesti između 248 i 336 putnika ovisno o varijanti. Najviše se ističe zbog svoje strukture od čak 80% kompozita, totalnom zamjenom pneumatskih sustava sa električnim te dosta udobnijom i čak do 60% u odnosu na prethodnike tišom kabinom za putnike. [6]

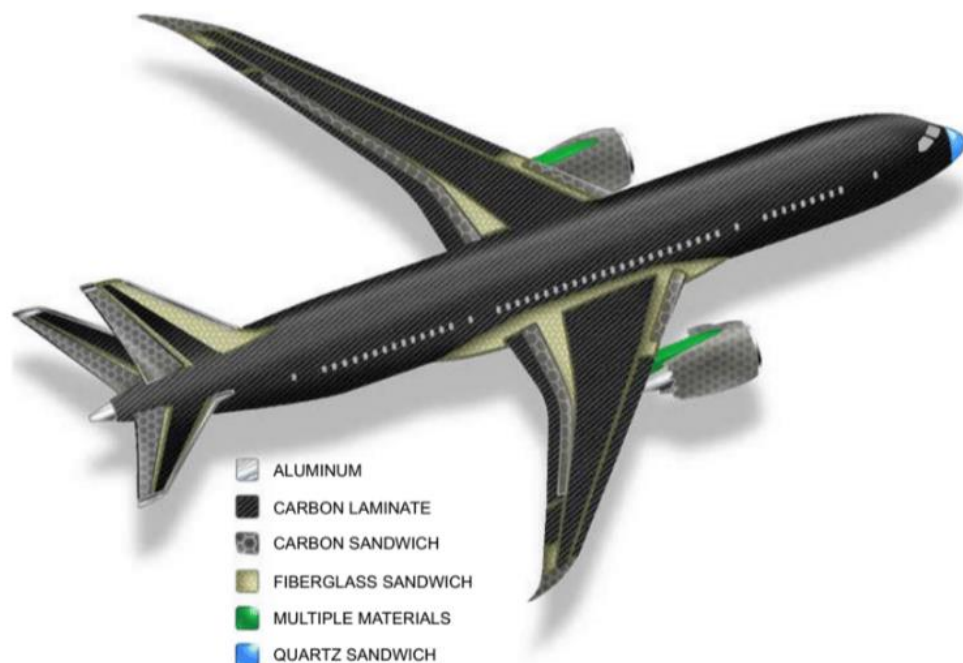


Slika 17 Usporedba Boeinga 787-8/9/10 [3]

### 3.2.1.1. Prvi zrakoplov kompozitne strukture

Boeing 787 je prvi putnički zrakoplov koji koristi kompozite za većinu strukture trupa i krila. Sastoji se od CFRP i GFRP kompozita. CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic – Plastika ojačana ugljičnim vlaknima) su kompoziti karbonskih vlakana ojačani plastičnom smolom. Karbonska vlakna su višestruko snažniji materijal od čelika i to za petinu težine čelika, ali su zato savitljivi te ih zbog toga ojačavamo plastičnom smolom te dobivamo savršeni izdržljivi materijal. U prošlosti najveći problem kod pravljenja velikih dijelova od karbonskih vlakana je bilo vrijeme i strpljenje koje je potrebno kako bi se nanijeli mnogo brojni slojevi. Kako bi zaobišli taj problem Boeing-ovi inženjeri koriste automatizirano nanošenje slojeva CFRP oko kalupa u obliku trupa te tim strojem precizno kontroliraju preklapanje slojeva i orijentaciju vlakana kako bi dobili željenu vlačnu čvrstoću. Nakon toga dijelovi trupa odlaze u ogromne pećnice koje zagrijavaju materijal kako bi dovoljno očvrstnili. Te ogromne pećnice u koje stane trup putničkog zrakoplova iziskuju velika ulaganja ali su prednosti vrijedne toga. Svaki 787 je napravljen od oko 35 tona CFRP, od kojih je 23 tone čistih karbonskih vlakana. Isto korišteni GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic – Plastika ojačana staklenim vlaknima) su kompoziti od fiberglasa koji su za razliku od CFRP jeftiniji, ali zato teži i manje kruti.

Kompoziti nisu jedini materijali korišteni na zrakoplovu. Zbog lošeg otpora na udarce umjesto kompozita na vodećim rubovima krila i stabilizatora bilo je potrebno koristiti aluminij te na rubovima lopatica turbine titanij. [4]

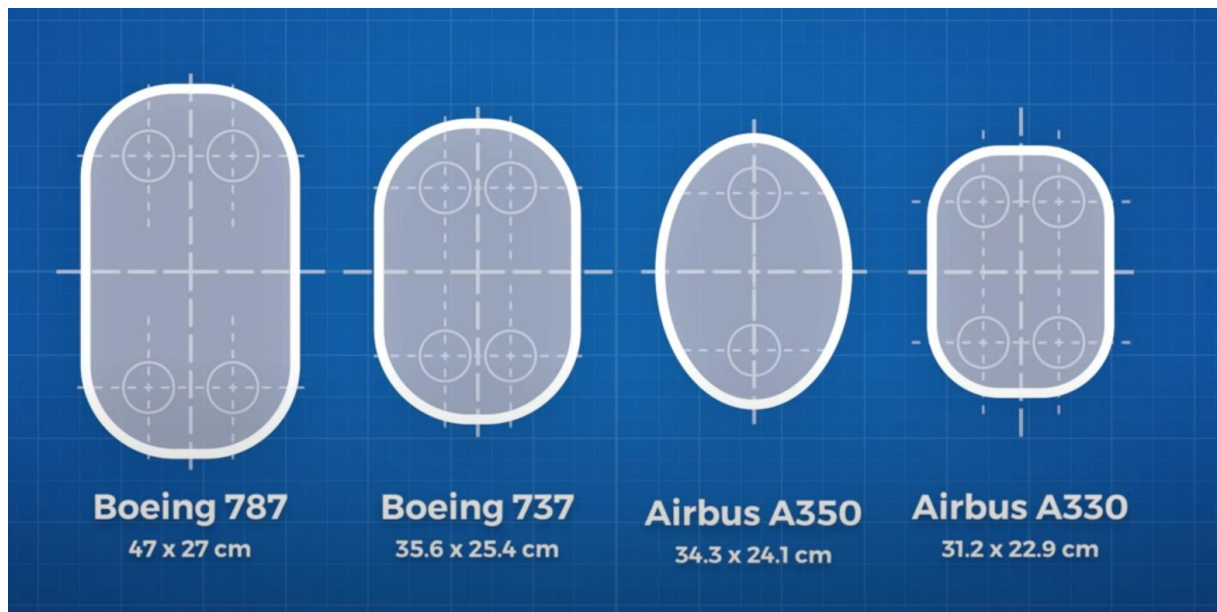


*Slika 18 Struktura Boeinga 787 [3]*

### *3.2.1.2. Udobnost putnika*

Kako je cilj inženjera iz Boeinga bio povećati maksimalnu udaljenost koju ovaj zrakoplov možeš preći, time i povećati vrijeme putovanja, dobili su time još jedan zadatak; kako napraviti te duge letove što udobnijim. Prvi cilj je bio smanjiti buku, što su i postigli smanjivanjem buke motora kao što je prethodno opisano. Zbog čvrstoće koja donosi kompozitna struktura inženjeri su uspješno povećali tlak u kabini koje je kod prethodnika bio jednak onom na 8000ft ili 2438m na 6000ft ili 1828m što dosta utječe na udobnost pri letenju te smanjuje efekte "jet lagga". Jača struktura isto je pridonijela i dosta većim prozorima ugrađenim u Boeingu 787 za razliku od ostalih zrakoplova kao prikazano na slici 19. Kod aluminijskih struktura nije moguće ugraditi tolike prozore jer bi na tim mjestima dolazilo do nakupljanja naprezanja materijala oko rubova prozora te bi se s vremenom nakupljale pukotine koje bi skratile životni vijek zrakoplova. [4]

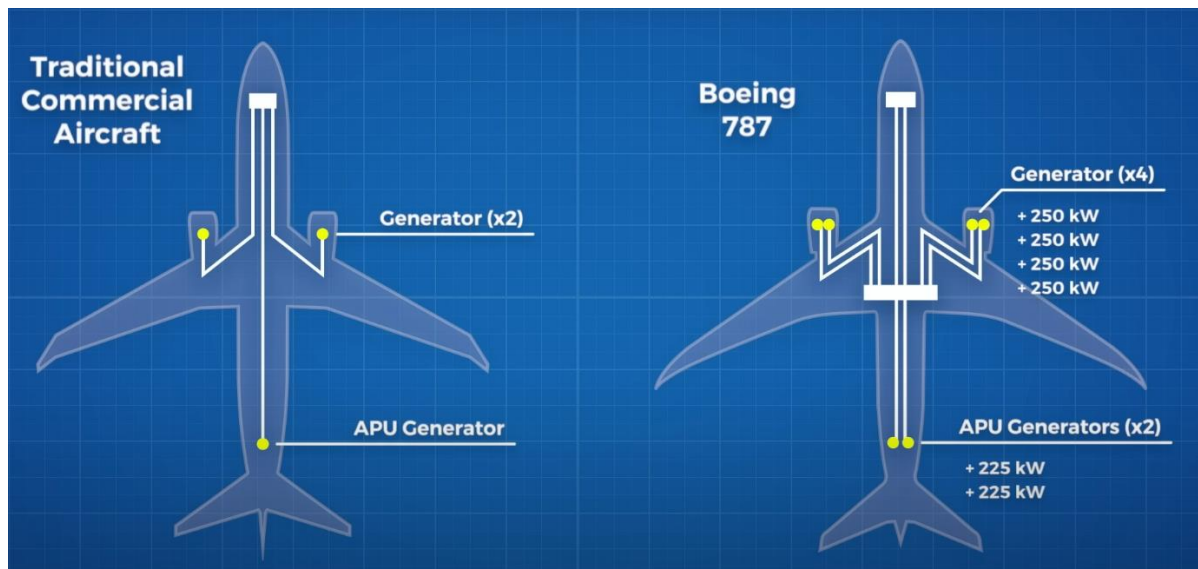




Slika 19 Usporedba veličine prozora na Boeingu 787 i ostalim zrakoplovima [4]

### 3.2.1.3. Električni sustav

Najznačajniji napredak Boeinga 787 je zamjena pneumatskih i nekih hidrauličkih sustava električnim. Možemo početi od pokretanja motora koji se kod prethodnika provodio dovođenjem vrućeg zraka u turbinu pomoću vanjske jedinice koja proizvodi stlačeni zrak ili preko APU-a koji se nalazi u repu zrakoplova. APU ili Auxiliary Power Unit je mala plinska turbina iz koje se dovodi vrući zrak u turbinu motora, može ga pokrenuti elektro-motor ili baterija. Kod Boeinga 787 APU ne opskrbljavaju motore potisnutim zrakom nego električnom strujom koja pokreće dva elektro-motora kod svakog GENx motora koji pokreću motor i opskrbljavaju Boeing 787 sa strujom. Sveukupno imamo po 2 elektro-motora-generatora na svakom motoru od kojih svaki proizvodi 250 kW struje i 2 elektro-motora na APU koji proizvode po 225 kW struje pojedinačno. Kad bi svih 6 bili pokrenuti u isto vrijeme dobivali bi ukupnu struju od 1.45 MW što je čak 4 puta više nego njegovi prethodnici poput Boeinga 777. [4]



Slika 20 Usporedba generatora na Boeingu 787 i tradicionalnim zrakoplovima [4]

Sada postavljamo pitanje zašto nam je potrebna tolika količina struje. Jedna od primjena te struje je kao što smo već prethodno spomenuli za opskrbu ventilacijskom sustava pošto više ne koristimo vrući zrak ili "bleed air". Kod prethodnika poput Boeinga 767 ili Boeinga 737 Classic ventilacijski sustav je funkcionirao na način da bi se uzimao vrući i stlačeni zrak iz kompresora motora koji je bio na temperaturama do čak 230°C te bi onda prolazio kroz komplicirani ventilacijski sustav i hladio ga pomoću izmjenjivača topline koji je koristio atmosferski zrak za hlađenje. Boeingovi inženjeri su se riješili mase tih brojnih cijevi i napravili potpuno električni ventilacijski sustav na Boeingu 787. Na donjem dijelu trupa imamo dva ulaza za zrak, jedan za električni kompresor i jedan za izmjenjivač topline. Zrak koji ide u električni kompresor ili po stručnom nazivu CAC (Cabin Air Compressor – Kompresor kabinskog zraka) se tlači i zagrijava te onda šalje u izmjenjivač topline, u koji ulazi atmosferski zrak iz drugog ulaza, koji hladi taj zrak i šalje ga u kabinu kako bi putnicima bilo ugodnije. Isto kao prije spomenuto takav električni sustav dopustio je Boeingu 787 da poveća pritisak zraka u kabini na osjet koji je kao na 1828m.



*Slika 21 Ulazi za zrak na trupu zrakoplova [4]*

Još jedan od načina na koji su inženjeri iskoristili tu struju je na sustav kočenja. Zaustaviti zrakoplov od 200000kg koji se kreće po pisti brzinom od 270 km/h nije lagan posao te treba tu energiju pretvoriti u drukčiju energiju kako bi se zrakoplov zaustavio. Možemo tu energiju izračunati kao kinetički energiju putem formule (3.1):

$$F = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (3.1)$$

te ako pretvorimo brzinu u m/s dobijemo formulu

$$F = \frac{1}{2} * 200000 * 75^2 = 562,500,000 \text{ J}$$

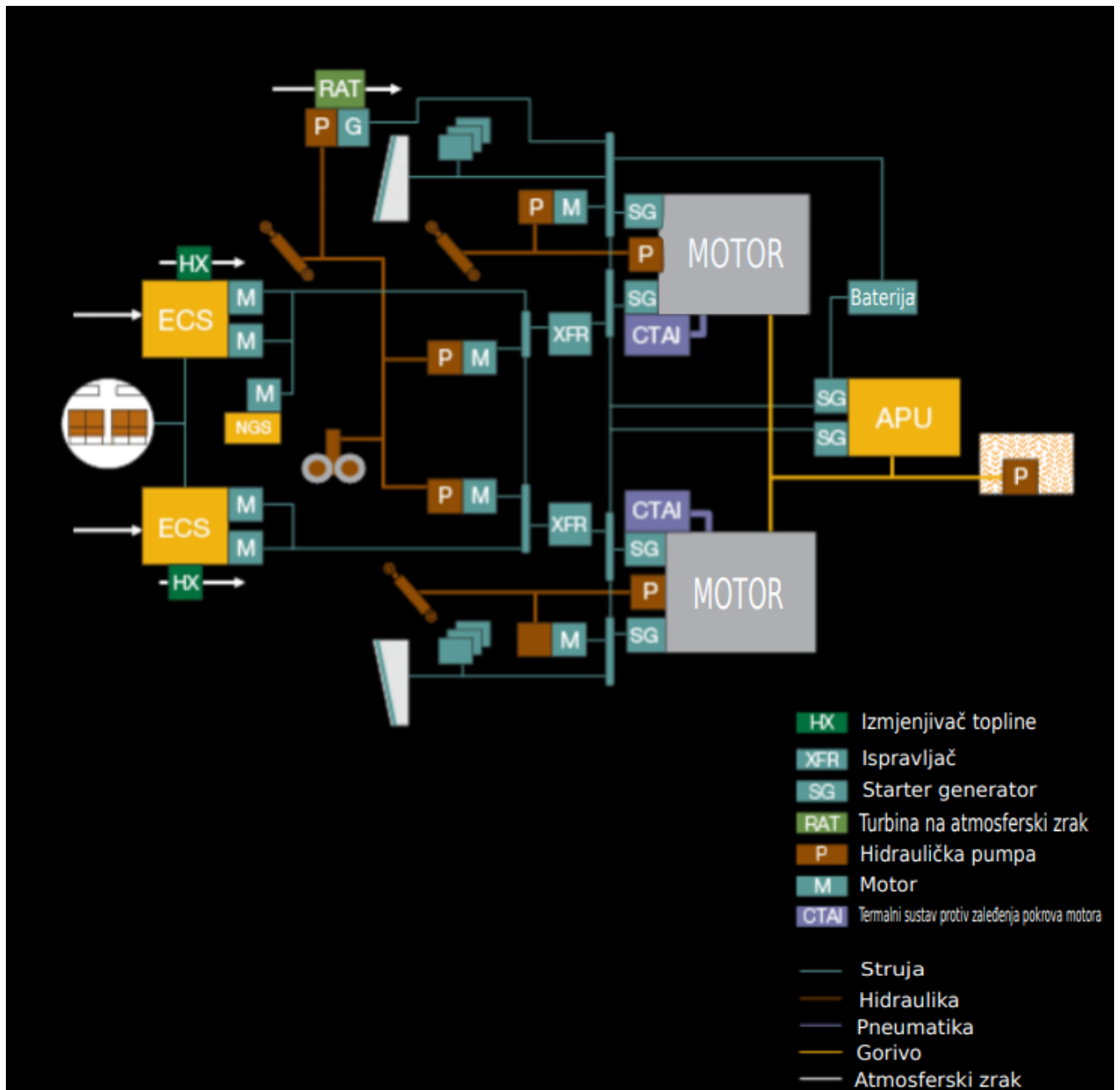
Prethodnici Boeinga 787 su koristili hidrauličke sustave kočenja gdje hidraulički klip koji pritišće disk uz kotač kako bi usporili zrakoplov. Na Boeingu 787 hidraulički sustav kočenja je zamijenjen električnim sustavom gdje na svakom od 8 kotača imamo sustav kočenja. Električni sustav kočenja funkcionira na način da upravljačka jedinica pokreće električni sustav i povezana je s motorima koji pretvaraju električnu energiju u pogon zupčanika, koji pokreću kuglični vijak i maticu. Vijak je povezan s klipom koji pritišće karbonske diskove zajedno. Ugrađivanjem tog sustava inženjeri su uspjeli uštedjeti između 62 i 111 kg. [4]



*Slika 22 Sustav kočenja na Boeingu 787 [3]*

Uz sustav kočenja još jedan hidraulički sustav koji su inženjeri zamjenili s električnim je sustav izvlačenja zakrilca.

#### 4. SHEMA ELEKTRIČNOG SUSTAVA BOEINGA 787



Slika 23 Elektro-shema Boeinga 787

Električni sustav Boeinga 787 za proizvodnju i pokretanje energije obično radi kao četvero-kanalni, varijabilni sustav izmjenične struje od 235 V. Svaki motor ima dva varijabilna frekvencijska starter generatora (SG). Svaki SG opskrbljuje energijom svojoj odgovarajućoj liniji izmjenične struje od 235 V. APU ima dva starter generatora od kojih svaki može napajati autobuse izmjenične struje od 235 V ako mu je potrebno. Postoje tri utičnice za vanjsko napajanje izmjeničnom strujom od 115 V. Svaka pojedinačna linija izmjenične struje od 235

V opskrbljuje energijom jedinicu za automatsku transformaciju i ispravljanje (XFR). XFR pretvara energiju od 235 V iz izmjenične struje u +/- 270 V istosmjerne struje za upotrebu od strane zajedničkih kontrolera pokretanja motora. Ako su svi sustavi izmjenične struje nedostupni, turbina na atmosferski zrak će se aktivirati i izaći s donje strane trupa zrakoplova. Ta turbina će opskrbljivati zrakoplov s 230 V izmjenične struje. Kao što vidimo na slici 23 i električni kompresori (ECS), koji služe za ventilaciju zraka, su povezani u elektro-shemu. Svaki od 2 električna kompresora (ECS) dobiva energiju od kontrolera pokretanja motora koji dobiva 270 V istosmjerne struje preko XFR-a. Električni kompresor dobiva zrak iz atmosfere koji se zagrije na preveliku temperaturu te mora proći kroz izmjenjivač topline (HX) koji zrak za hlađenje također uzima iz atmosfere. [3]

## 5. PRORAČUNI

Kako bi dokazali učinkovitost Boeinga 787 i ispravnu odluku inženjera iz Boeinga, provest ćemo termodinamički proračun motora te proračun napreznja na lopaticama turbine.

### 5.1. Termodinamički proračun motora

Zrakoplovni motori su na najvišem stupnju napreznja pri polijetanju te ćemo uzeti podatke za proračun pri najvećoj brzini pri polijetanju. Pri polijetanju motor usisava oko 1200kg zraka svake sekunde no kao prije navedeno kako imamo "bypass ratio" od 9:1 to znači da samo 1/9 tog zraka prolazi kroz motor te dobivamo maseni protok od 133 kilograma zraka po sekundi. Možemo pretpostaviti da je taj zrak na 11°C te atmosferskom tlaku od 0,1MPa pri ulazu u motor te ulazi u nisko-tlačni kompresor pa u visoko-tlačni kompresor preko kojih imamo omjer tlakova od 40 što znači da zrak izlazi pod 40 puta većim tlakom nego što je ušao. Nakon kompresora zrak odlazi u komoru izgaranja gdje se miješa s gorivo i zapaljuje te dostiže maksimalnu temperaturu od 2700°C. Pad tlaka od kompresora do turbine je 20 kPa. Možemo pretpostaviti unutarnje stupnjeve djelovanja za turbinu i kompresor  $\eta_t$  i  $\eta_k$ . Za proračun su nam još potrebni eksponent adijabate koji iznosi 1,4 te specifična toplina za zrak koja iznosi 1,003 kJ/kgK. Te podatke možemo prikazati kao:

$$m = 133 \text{ kg/s}$$

$$p_1 = 0,1 \text{ MPa}$$

$$T_1 = 11^\circ\text{C} = 284 \text{ K}$$

$$T_3 = 2700^\circ\text{C} = 2973 \text{ K}$$

$$\beta = p_2 / p_1 = 40$$

$$\Delta p = p_2 - p_3 = 20 \text{ kPa}$$

$$c_p = 1,003 \text{ kJ/kgK}$$

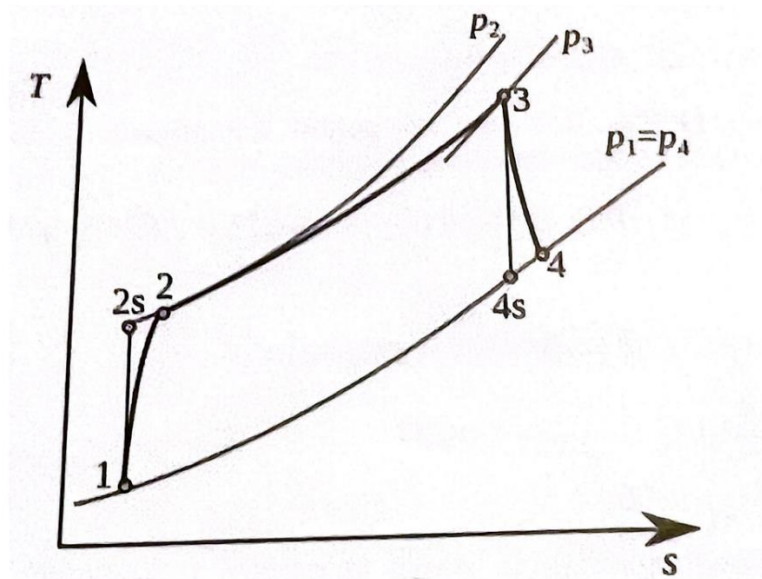
$$\kappa = 1,4$$

$$\eta_t = 0,9$$

$$\eta_k = 0,85$$

i krenuti s proračunom. [7]

Proračun mlaznog motora ćemo voditi po Braytonovom procesu te su točke poslagane kao prema slici 24:



Slika 24 Braytonov proces[2]

Prvo moramo dobiti tlakove i temperature po točkama te ćemo to dobiti po sljedećim formulama;

Točka 2s:

$$p_2 = p_1 * \beta = 0,1 * 40 = 4 \text{ MPA} \quad (5.1)$$

$$T_{2s} = T_1 * \beta^{(k-1)/k} = 284 * 40^{(1,4-1)/1,4} = 814,8 \text{ K} \quad (5.2)$$

Točka 2:

$$T_2 = T_1 + (T_{2s} - T_1) / \eta_k = 284 + (814,8 - 284) / 0,85 = 908,47 \text{ K} \quad (5.3)$$

Točka 3:

$$p_3 = p_2 - \Delta p = 4 - 0,02 = 3,98 \text{ MPa} \quad (5.4)$$

$$T_3 = 2973 \text{ K}$$

Točka 4s:

$$T_3 / T_{4s} = (p_3 / p_4)^{(k-1)/k} \quad (5.5)$$

iz čega slijedi:

$$T_{4s} = T_3 / (p_3 / p_4)^{(k-1)/k} = 2973 / (3,98 / 0,1)^{(1,4-1)/1,4} = 1037,73 \text{ K} \quad (5.6)$$



Točka 4:

$$p_4 = p_1 = 0,1 \text{ MPa}$$

$$T_4 = T_3 - \eta_t * (T_3 - T_{4s}) = 2973 - 0,9*(2973-1037,73) = 1231,26 \text{ K} \quad (5.7)$$

Sad kad imamo sve točke možemo izračunati radove za pogon kompresora i turbine.

Rad kompresora računamo pomoću razlike entalpija u točkama 2 i 1:

$$W_k = h_2 - h_1 = c_p * (T_2 - T_1) = 1,003 * (908,47 - 284) = 626,34 \text{ kJ/kg} \quad (5.8)$$

Te kad pomnožimo rad s masenim protokom dobijemo snagu:

$$P_k = m * W_k = 133 * 626,34 = 83303,22 \text{ kW} \quad (5.9)$$

Isto kao za kompresor tako i računamo rad i snagu turbine pomoću točaka 3 i 4:

$$W_t = h_3 - h_4 = c_p * (T_3 - T_4) = 1,003 * (2973 - 1231,26) = 1746,97 \text{ kJ/kg} \quad (5.10)$$

$$P_t = m * W_t = 133 * 1746,97 = 232347,01 \text{ kW} \quad (5.11)$$

Omjer radova kompresora i turbine je:

$$W_k / W_t = 626,34 / 1746,97 = 0,36 \quad (5.12)$$

Efektivni rad stvarnog procesa plinske turbine je:

$$W = W_t - W_k = 1746,97 - 626,34 = 1120,63 \text{ kJ/kg} \quad (5.13)$$

Toplina dovedena gorivom u komori izgaranja je:

$$q = h_3 - h_2 = c_p * (T_3 - T_2) = 1,003 * (2973 - 908,47) = 2070,72 \text{ kJ/kg} \quad (5.14)$$

Dodajući maseni protok dobijemo energiju u kW:

$$Q = m * q = 133 * 2070,72 = 275405,76 \text{ kW} \quad (5.15)$$

Stupanj djelovanja možemo dobiti iz omjera neto snage mlaznog motora i topline dovedene gorivom:

$$\eta = W / q_{dov} = 1120,63 / 2070,72 = 0,54 \quad (5.16)$$

Dobiveni stupanj djelovanja je u stvarnosti prevelik te pretpostavljamo da smo krivo procijenili unutarnje stupnjeve djelovanja turbine i kompresora i da bi trebali biti niži. Isto tako se možemo osloniti na činjenicu da ovo nisu točno izmjereni podaci već približni i procijenjeni.

## 5.2. Proračun naprezanja lopatica turbine

Pri rješavanju jednih od najbitnijih unaprijeđenja motora, "bypass ratio"-a kao prije navedeno u tekstu, inženjeri iz General Electrica morali su odabrati maksimalnu veličinu lopatica koje mogu koristiti kako bi dobili što veći "bypass ratio". Pri tome su morali riješiti problem centrifugalne sile koja djeluje na te lopatice. Tu silu ćemo izračunati pomoću jednostavne formule:

$$F = m * w^2 * r \quad (5.17)$$

Gdje su nam:

$F$  = sila (N)

$m$  = masa (kg)

$w$  = kutna brzina (rad)

$r$  = radijus težišta lopatice (m)

Kako znamo da je dijаметar ventilatora 2.82 m te da je duljina same lopatice 1.079 m možemo izračunati promjer rotora pomoću formule:

$$d_{vratila} = d_{ventilatora} - 2 * l_{lopatice} = 2.82 - 2 * 1.079 = 0.662m \quad (5.18)$$

Kako bi došli do radijusa težišta lopatice uzimamo radijusa rotora te pola radijusa lopatice:

$$r = r_{vratila} + \frac{1}{2} * l_{lopatice} = 0.331 + \frac{1}{2} * 1.079 = 0.8705\text{m} \quad (5.19)$$

Procijenjena masa lopatice je oko 20kg. Iz izvora podataka istog kao i za prošli proračun imamo brzinu okretanja ventilatora od 2400 okretaja po minuti što možemo pretvoriti u radijane pomoću formule :

$$w = (\text{okr} * 2\pi) / 60 = (2500 * 2 \pi) / 60 = 261,8 \text{ rad/s} \quad (5.20)$$

Sad kad imamo sve potrebne podatke možemo ih samo uvrstiti u formulu (5.17) i dobiti silu koju su inženjeri morali svladati:

$$F = 20 * 261,8^2 * 0.8705 = 1193,27 \text{ kN}$$

Tu silu koristili su za računanje naprezanja na lopaticama. Naprezanje je omjer raspodjele sile po površini. Kako nemamo dostupne točne dimenzije za lopaticu pretpostaviti ćemo površinu od  $0.01 \text{ m}^2$

$$A_{lopatice} = 0.01 \text{ m}^2$$

Površinu uvrštavamo sa silom u formulu za naprezanje:

$$\sigma = F / A_{lopatice} = 1193,27 * 10^3 / 0.01 = 119,327 \text{ MPa} \quad (5.21)$$

Maksimalno naprezanje za CFRP materijal od kojeg su lopatice napravljene je:

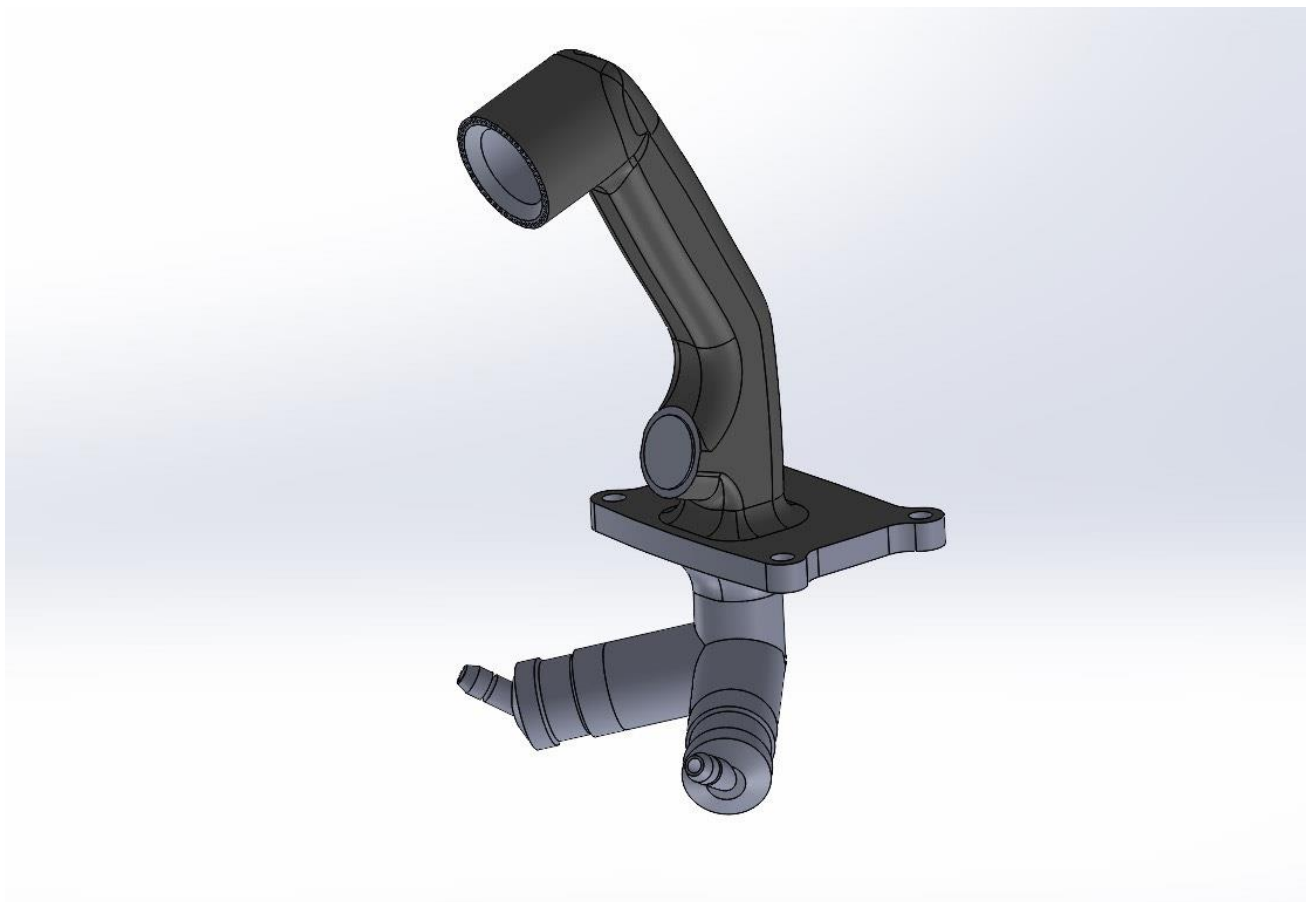
$$\sigma_{max} = 1200 \text{ MPa}$$

Te naš proračun zadovoljava uvjet:

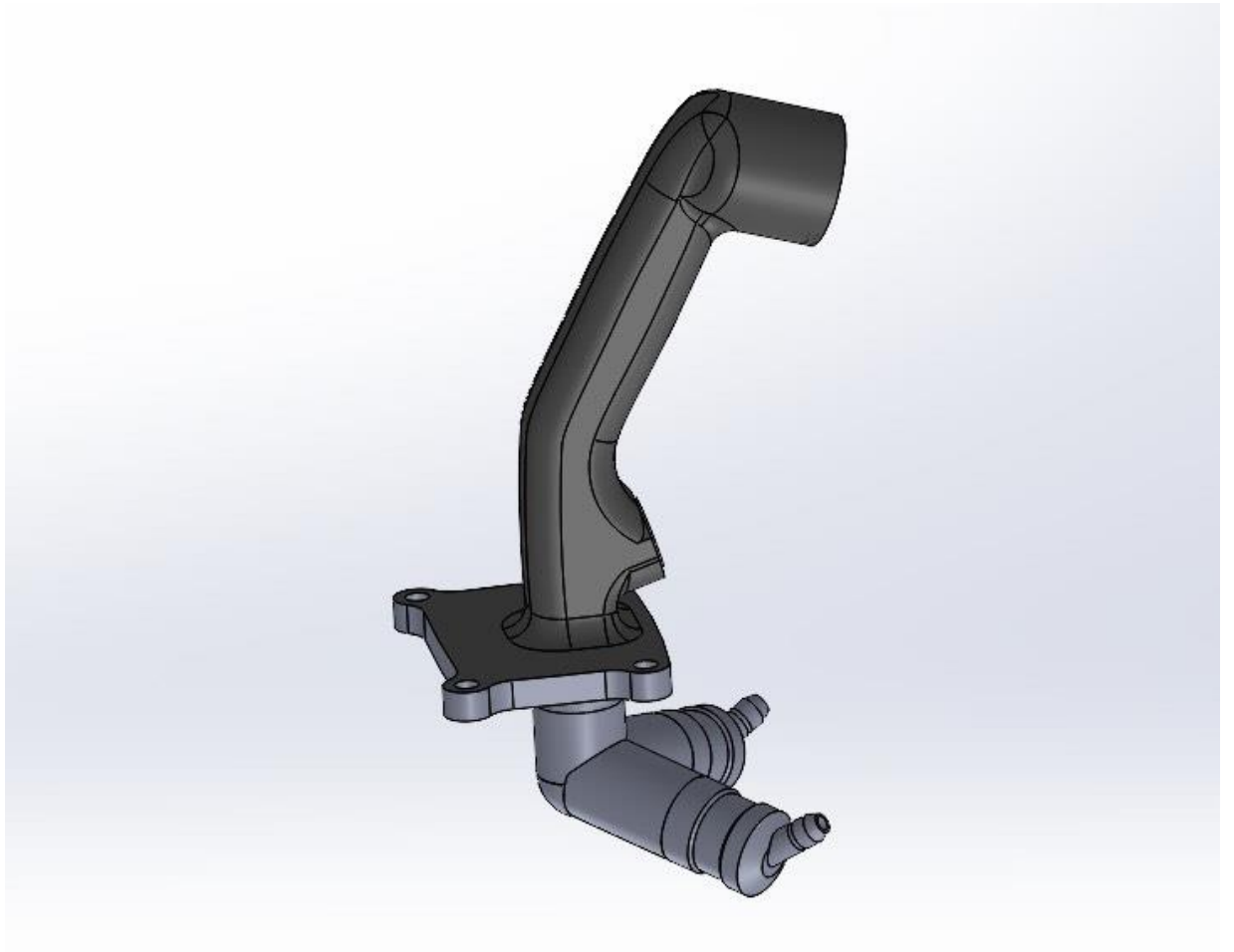
$$\sigma < \sigma_{max}$$

## 6. MODEL MLAZNICE ZA GORIVO GENX MOTORA

Povećanjem kompresijskog omjer tako i veće temperature u komori izgaranja došlo je do novog problema kojeg su inženjeri morali razrješiti – povećanje emisije NOx. Kako bi to spriječili razvili su revolucionarne TAPS mlaznice koje predmiješaju gorivo i zrak kako bi dobili optimalnu smjesu s manjom emisijom NOx. Razvoj efikasne mlaznice započeo je još 1995. suradnjom NASA-e i GE-a no razvoj zahtjevnog 3d printanja metala omogućilo je inženjerima da naprave ovakvu mlaznicu s nizom unutarnjih tunelića koji omogućuju ovakvo mješanje. Kako bi replicirali tu mlaznicu izradio se 3d model u softveru CATIA V5. Pošto nikakve veličine nisu dostupne javno sve veličine su svojevrijedno procijenjene i počelo se s pretpostavkom da je ukupna duljina mlaznice 20cm. Modeliranje se započelo od gornjeg ventila funkcijom boss extrude, dodavajući ravnine do prirubnice i koristeći funkcije loft i fillet. Nakon toga je napravljena prirubnica i nastavljeno je s ekstrudanjem donjih ventila. U donje ventile dolazi gorivo čiji pritisak kontrolira ventil za podjelu protoka, kojeg kontrolira EEC (elektronički kontroler motora). Tu se gorivo miješa i šalje gorivo dalje u glavni ventil koji to gorivo šalje u komoru izgaranja na izgaranje. [3]



*Slika 25 3D model mlaznice za gorivo*



*Slika 26 3D model mlaznice za gorivo*

## 7. ZAKLJUČAK

Zrakoplovna industrija donijela je revoluciju u globalnom povezivanju i ubrzala ekonomski razvoj, ali isto tako je i postala izazov za održavanje ravnoteže između potreba zračnog prometa i zaštite okoliša. Boeing 787 i GEnx motor predstavljaju dokaz neumorne težnje inženjera za inovacijama i izvršnošću. Kroz revolucionarne napretke u materijalima, dizajnu i tehnologiji redefinirali su standarde učinkovitosti, udobnosti i održivosti u zrakoplovstvu. Od revolucionarnog korištenja kompozitnih materijala do sustava visokih performansi i aerodinamike Boeing 787 predstavlja temelj u razvoju zrakoplovstva u sljedećim desetljećima koji dolaze.

Osim toga, uspjeh programa Boeinga 787 naglašava važnost suradnje s vanjskim suradnicima i prilagodljivosti pri postizanju ciljeva. Partnerstvo Boeinga s dobavljačima, zrakoplovnim tvrtkama i regulatornim tijelima bilo je ključno u prevladavanju izazova i pomaku granica onoga što je moguće u proizvodnji zrakoplova.

Uspoređujući Boeing 787 s njegovim prethodnicima uvidjeli smo kako brzo tehnologija napreduje i koliko daleko ljudski um može dosegnuti. Vidjeli smo kako je isto tako bitno ne zadržavati se na starim principima koji put nego posegnuti dalje, poput revolucionarnog pomaka s pneumatskih sustava na elektroničke u kojima leži budućnost inženjerstva. Boeing 787 je već inspirirao nove naraštaje zrakoplovstva što možemo vidjeti u primjeni dizajna kokpita B787 pri izradi najnovijeg Boeing-ovog zrakoplova Boeinga 777X.

Zaključno, Boeing 787 predstavlja ne samo izvanredno postignuće u inženjerstvu već je i simbol ljudske inovativnosti i težnje.

## 8. LITERATURA

- [1] "The Invention of the Jet engine", Stanford University, 2004, s interneta, <https://cs.stanford.edu/people/eroberts/courses/ww2/projects/jet-airplanes/planes.html>, 05.03.2024
- [2] Senčić, T. , "Plinske turbine", predavanje iz kolegija Toplinski strojevi i uređaji
- [3] Aviation Training Services, "Boeing 787-8/9/10(GEnx) Training Manual", namijenjeno za internu upotrebu, 2023
- [4] Real Engineering, "The insane engineering of the GEnx", s interneta, [https://www.youtube.com/watch?v=Sf6H8kSunRA&t=830s&ab\\_channel=RealEngineering](https://www.youtube.com/watch?v=Sf6H8kSunRA&t=830s&ab_channel=RealEngineering) , 01.03.2024
- [5] General Electric, "GEnx", s interneta, <https://www.geaerospace.com/commercial/aircraft-engines/genx> , 10.03.2024
- [6] The Boeing Company, "787 Dreamliner", s interneta, <https://www.boeing.com/commercial/787> , 10.03.2024
- [7] Page, C. , Powering the Dreamliner: How the 787's GEnx engines work, s interneta, <https://thepointsguy.com/guide/powering-the-dreamliner-how-the-787s-genx-engines-work/> , 25.04.2024

## 9. POPIS SLIKA

Slika 1 Heinkel He 178 [1].....	2
Slika 2 Princip rada mlaznih motora [2] .....	3
Slika 3 Turbo-mlazni motor [2] .....	4
Slika 4 Turbo-ventilatorski motor .....	5
Slika 5 Turbo-propelerni motor.....	5
Slika 6 Turbo-osovinski motor.....	6
Slika 7 Ventilator [3].....	7
Slika 8 Nisko-tlačni i visoko-tlačni kompresori.....	8
Slika 9 Komora izgaranja .....	9
Slika 10 Nisko-tlačna turbina .....	10
Slika 11 Visoko-tlačna turbina .....	10
Slika 12 Boeing 787 s GENx motorima.....	11
Slika 13 Lopatice turbine GENx motora.....	12
Slika 14 TAPS mlaznica za gorivo [4] .....	13
Slika 15 EEC na GENx motoru .....	14
Slika 16 Regulacija protoka zraka pomoću chevrona [4] .....	15
Slika 17 Usporedba Boeinga 787-8/9/10 [3].....	16
Slika 18 Struktura Boeinga 787 .....	17
Slika 19 Usporedba veličine prozora na Boeingu 787 i ostalim zrakoplovima [4].....	18
Slika 20 Usporedba generatora na Boeingu 787 i tradicionalnim zrakoplovima [4] .....	19
Slika 21 Ulazi za zrak na trupu zrakoplova [4] .....	20
Slika 22 Sustav kočenja na Boeingu 787 [3].....	21
Slika 23 Elektro-shema Boeinga 787 .....	22
Slika 24 Braytonov proces[2].....	25
Slika 25 3D model mlaznice za gorivo .....	29
Slika 26 3D model mlaznice za gorivo .....	30



## 10. POPIS OZNAKA I KRATICA

TAPS - Twin Annular Premixing Swirler – Dvostruko prstenasti predmiješajući vrtložnik

FADEC - Full Authority Digital Engine Control – Digitalna kontrola motora s punim ovlastima

EEC – Electronic Engine Controller – Elektronička kontrola motora

CFRP – Carbon-fiber Reinforced Polymer – Plastika ojačana ugljičnim vlaknima

GFRP – Glass-fiber Reinforced Polymer – Plastika ojačana staklenim vlaknima

APU – Auxiliary Power Unit – Pomoćna snaga za jedinicu

CAC – Cabin Air Compressor – Kompresor kabinskog zraka

SG – Starter Generator

XFR – Transformer

ECS – Electrical Compressor – Električni kompresor

HX – Heat Exchanger – Izmjenjivač topline

$F$  – sila [N]

$m$  – masa [kg]

$v$  – brzina [m/s]

$w$  – kutna brzina [rad]

$p$  – tlak [MPa]

$T$  – temperatura [K]

$\beta$  – omjer tlakova

$c_p$  – specifična toplina [kJ/kgK]

$\kappa$  – eksponent adijabate

$\eta_t$  – unutarnji stupanj djelovanja za turbinu

$\eta_k$  – unutarnji stupanj djelovanja za kompresor

$W_k$  – rad kompresora [kJ/kg]

$W_t$  – rad turbine [kJ/kg]

$q$  – dovedena toplina [kJ/kg]

$\eta$  – stupanj djelovanja procesa

$P_t$  – snaga turbine [W]

$P_k$  – snaga kompresora [W]

$A$  – površina [m<sup>2</sup>]

$l$  – duljina [m]

$\sigma$  – naprezanje [Pa]

## 11.SAŽETAK

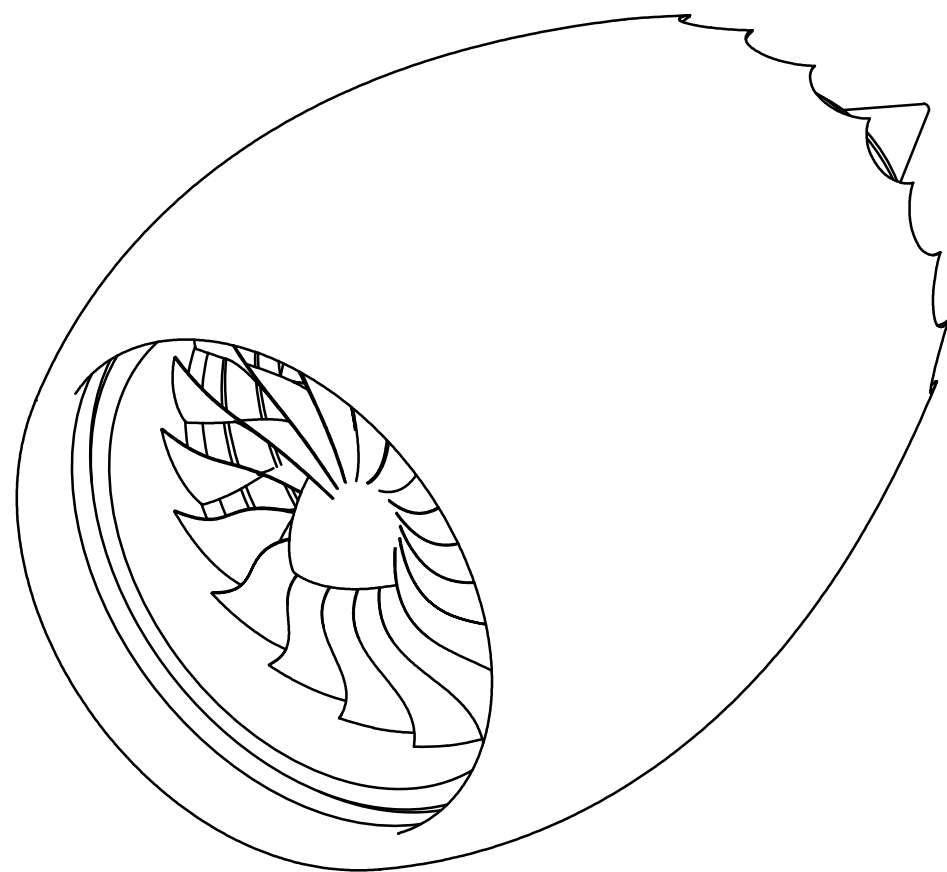
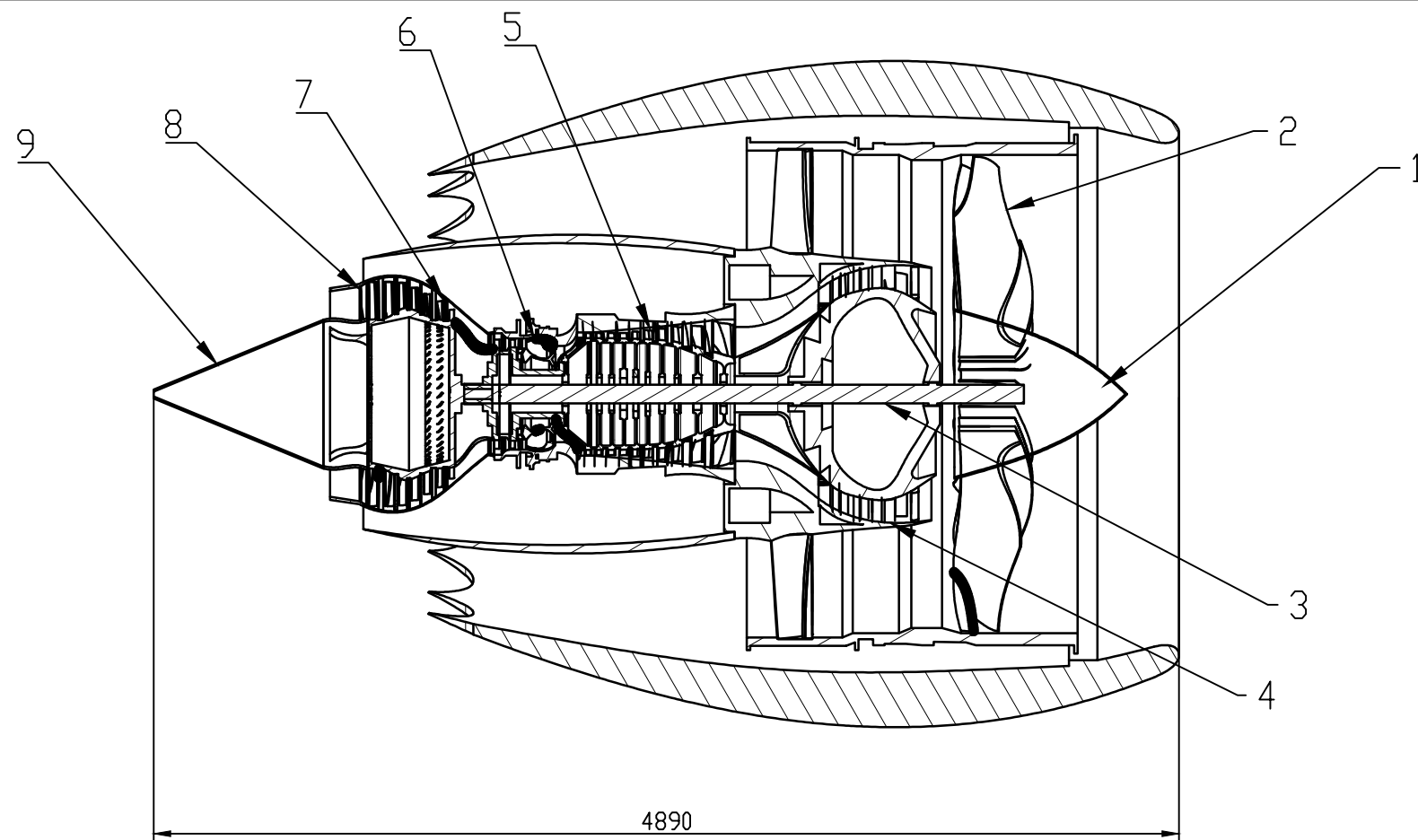
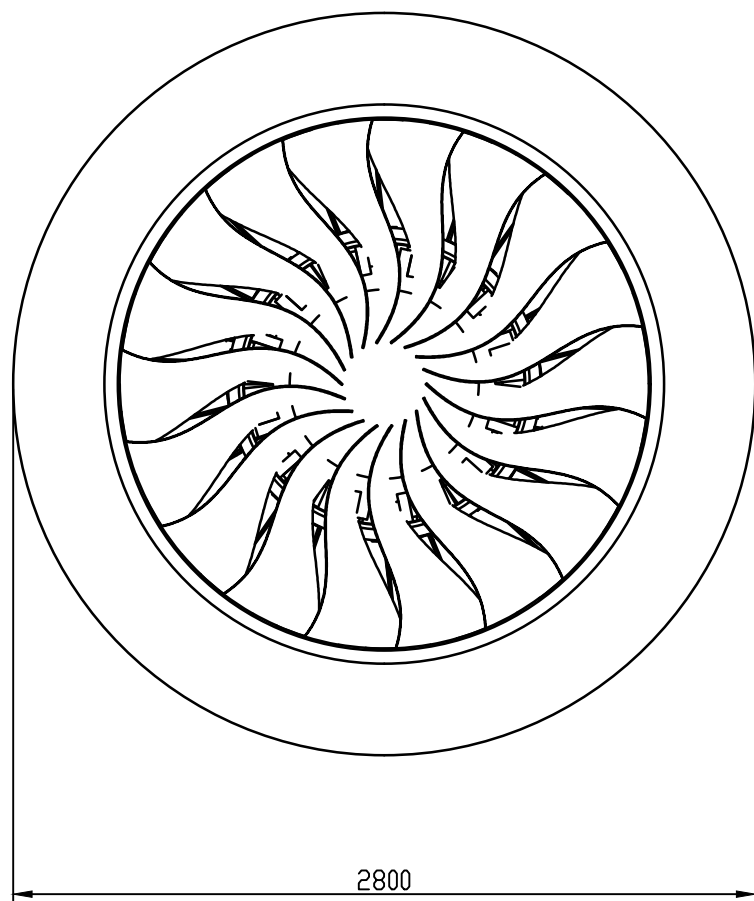
Ovim radom opisana je kratka povijest mlaznih motora, njihov princip rada, njihova podjela te njihovi dijelovi. Detaljno je objašnjen napredak Boeinga 787 i njegovog pogonskog motora GENx-1B u usporedbi s njegovim prethodnicima. Objašnjen je put do veće učinkovitosti i smanjenja buke motora GENx-1B pomoću većeg dijametra ventilatora, karbonskih lopatica te inovativnih mlaznica za gorivo. Prikazano je kako je Boeing 787 sa svojom kompozitnom strukturom napravio velike korake pri velikoj učinkovitosti i udobnosti putovanja u usporedbi sa svojim prethodnicima s električnom ventilacijom, većim pritiskom u kabini te velikim prozorima. Napravljena je i ukratko objašnjena elektro-shema za ovaj zrakoplov. Napravljeni su termodinamički proračun i proračun napreznja lopatica turbina. Na kraju su napravljeni 3D modeli inovativne TAPS mlaznice za gorivo i sklopni nacrt motora.

Ključne riječi: mlazni motor, Boeing 787, gorivo, učinkovitost, udobnost, električni sustav, proračun, konstruiranje

### Abstract



This paper describes the brief history of jet engines, their operating principle, classification and its components. It elaborates on the advancements of the Boeing 787 and its propulsion engine the GENx-1B compared to its predecessors. The path to greater efficiency and reduced noise of the GENx-1B engine is explained through its larger fan diameter, carbon blades and innovative fuel nozzle. It demonstrates how the Boeing 787, with its composite structure, has made significant strides in efficiency and travel comfort compared to its predecessor with electric ventilation, higher cabin pressure and larger windows. An electrical schematic for this aircraft is also briefly explained. Thermodynamic calculations and stress calculations of turbine blades are conducted. Finally, a 3D model of the innovative TAPS fuel nozzle and assembly drawings of the engines are created.

Key words: jet engine, Boeing 787, fuel, efficiency, comfort, electrical system, calculation, construction



POZ.	KOL	NAZIV	MATERIJAL	STANDARD
1	1	Rotor ventilatora	CFRP	
2	18	Lopatica ventilatora	CFRP, rubovi od titanija	
3	1	Vratilo	čelik	
4	1	Nisko-tlačni kompresor	Ti-6Al-4V	
5	1	Visoko-tlačni kompresor	Ti-6242	
6	1	Komora izgaranja	superlegura	
7	1	Visoko-tlačna turbina	superlegura	
8	1	Nisko-tlačna turbina	TiAl legura	
9	1	Izlazna mlaznica	čelik	

Poz.	Kom.	Naziv dijela	Standard/normni broj/broj nacrtu	Materijal		
Br. re.	Datum	Inicijali	Datum	Ime i prezime	Potpis	Mjerilo: M 1:40
			Nacrtao: 26.04.2024	Mihovil Magaš		
			Provjerio:			
			Odobrio:			

 Sveučilište u Rijeci TEHNIČKI FAKULTET 51000 RIJEKA, Vukovarska 58, HRVATSKA	 Označavanje zavora:	Površinska hrapavost:	Akad. god.: 2023./2024.
	Naziv sklopa: GE <sub>n</sub> -1B mlazni motor	Broj skl. crteža: 1	List/listova: 1
		Program broj: 1	Format: A3