



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**„GE CF6-80E“ turboventiliatorinio variklio veleno mazgo  
tyrimas ir konstrukcijos tobulinimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Tomas Genevičius**  
Projekto autorius

**Prof. habil. dr. A. Fedaravičius**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2018**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**„GE CF6-80E“ turboventiliatorinio variklio veleno mazgo  
tyrimas ir konstrukcijos tobulinimas**

Baigiamasis magistro projektas  
Aeronautikos inžinerija (621H40001)

---

**Tomas Genevičius**  
Projekto autorius

**Prof. habil. dr. A. Fedaravičius**  
Vadovas

**Prof. dr. Artūras Keršys**  
Recenzentas

---

**Kaunas, 2018**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas  
Tomas Genevičius

## **„GE CF6-80E“ turboventiliatorinio variklio veleno mazgo tyrimas ir konstrukcijos tobulinimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Tomas Genevičius, baigiamasis projektas tema „GE CF6-80E turboventiliatorinio variklio veleno mazgo tyrimas ir konstrukcijos tobulinimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

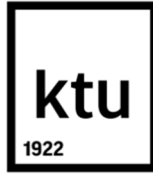
Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

Studijų programa: Aeronautikos inžinerija

**MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO PROJEKTO**  
**UŽDUOTIS**

Studentui(-ei)

1. Baigiamojo projekto tema

*„GE CF6-80E“ turboventiliatorinio variklio veleno mazgo tyrimas ir konstrukcijos tobulinimas*

*„GE CF6-80E“ engine shaft assembly analysis and design improvement*

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

*Atlikti reaktyvinio variklio „CF6-80E“ veleno mazgo inžinerinį tyrimą, pateikti veleno tvirtinimo problemos sprendimo būdus, sukurti naujus elementus esamai konstrukcijai, atlikti atsparuminius skaičiavimus bei nustatyti variklių darbo temperatūrų normas ir leistinus ciklus.*

3. Pradiniai Projekto duomenys

*Eksperimentinis variklio velenų tyrimas*

4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

*Atsižvelgiant į temos aktualumą atlikti variklio veleno tyrimą ir pateikti problemos sprendimo būdus.*

5. Projekto aprašomosios dalies struktūra

*Reaktyvinio variklio konstrukcinė ir eksploatacinė analizė*

*Reaktyvinio variklio veleno mazgo parametrai ir tobulinimo kryptys*

*Variklio darbo eksploatacinių parametrų skaičiavimai*

## 6. Grafinės Projekto dalies sudėtis

## 7. Projekto konsultantai

Magistrantas: **Tomas Genevičius**

*(vardas, pavardė, parašas, data)*

Projekto vadovas prof. habil. dr. **A. Fedaravičius**

*(vardas, pavardė, parašas, data)*

Krypties studijų programos vadovas lekt. dr. **Janina Jablonskytė**

*(vardas, pavardė, parašas, data)*

Tomas Genevičius. „GE CF6-80E“ turboventiliatorinio variklio veleno mazgo tyrimas ir konstrukcijos tobulinimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. habil. dr. A. Fedaravičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Aeronautikos inžinerija (E14), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: Reaktyvinis, variklis, turboventiliatorinis, velenas, vibracijos, guolis, veržlė, modeliavimas.

Kaunas, 2018. 62 p.

## SANTRAUKA

Pirmuose šio baigiamojo magistro darbo skyriuose išnagrinėti „General Electric“ reaktyviniai varikliai, jų konstrukcijos ir eksploatacijos duomenys. Nustatyti „CF6-80“ variklių konstrukcinių mazgų skirtumai. Daugiausia dėmesio skiriama velenams ir guolių sistemoms bei velenų tvirtinimo mazgams. Darbe išspręsta „GE CF6-80E“ variklio veleno guolio tvirtinimo mazgo konstrukcijos problema ir pasiūlyti sprendimo būdai. Kituose projekto skyriuose nustatyti problemos atsiradimo požymiai ir guolio veržlės atsisukimo procesai. Naudojantis atlikta analize ir „SOLIDWORKS“ programine įranga, sumodeliuoti veleno galinio karterio konstrukciniai elementai – užrakinimo elementas bei karterio dangtelis. Projekte atlikti šių elementų stiprumo skaičiavimai – nustatytos konstrukcinius elementus veikiančios jėgos, jų deformacijos ir poslinkiai. Atlikto tyrimo, modeliavimo ir skaičiavimų rezultatai pateikti išvadose ir apibendrinimuose.

Tomas Genevičius. CF6-80E turbofan engine shaft assembly analysis and design improvement. Master's Final Degree Project supervisor prof. habil. dr. A. Fedaravičius; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Aeronautical Engineering (E14), Engineering Science.

Keywords: Jet, engine, turbofan, shaft, vibrations, bearing, inner nut, mid-shaft, simulation.

Kaunas, 2018. 62 pages.

## SUMMARY

In the first parts of this final master project General Electric turbofan jet engines, their design and technical data are analysed. Considered the CF6-80E engines assembly differences. The project focuses on engine shafts, bearing systems and bearing assembly. In the last project parts was established signs of occurrence problem and bearing inner nut loss processes. Using technical analysis and collected data, engine mid-shaft bearing assembly elements performed computer simulations of SOLIDWORKS. After calculations are valued mid-shaft rear bearing elements acting force and displacement. The results of the research project are presented in the conclusions and summaries.

## Turinys

SANTRAUPŲ IR TERMINŲ ŽODYNAS .....	
PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS .....	
LENTELIŲ SĄRAŠAS .....	
ĮVADAS .....	1
1. REAKTYVINIO VARIKLIO KONSTRUKCINĖ IR EKSPLOATACINĖ ANALIZĖ .....	3
1.1 Turboventiliatorinis reaktyvinis variklis ir veikimo principas .....	4
1.2 „CF6“ variklių sistemos ir eksploatacija .....	6
1.3 „CF6-80E“ variklio ir velenų darbo parametrai .....	10
1.4 Variklio techninių charakteristikų leistinos ribos .....	13
1.5 Variklio guoliai ir velenų sistemos .....	17
1.6 Veleno tvirtinimo mazgo guolio problema .....	26
2. REAKTYVINIO VARIKLIO VELENO MAZGO PARAMETRAI IR TOBULINIMO KRYPTYS .....	29
2.1 Eksperimentinis veleno tyrimas .....	29
2.2 Veleno guolio mazgo parametrų nustatymas .....	32
2.3 Variklio mazgo gamybos medžiagos .....	35
2.4 Konstrukcinių tvirtinimo elementų charakteristikų nustatymas .....	39
2.5 Veleno galinio mazgo modeliavimas .....	41
2.6 Galinio karterio mazgo stipruminiai skaičiavimai .....	45
3. VARIKLIO DARBO EKSPLOATACINIŲ PARAMETRŲ SKAIČIAVIMAI .....	52
3.1 Variklio darbo temperatūra .....	53
3.2 Optimalių variklio ciklų nustatymas .....	59
IŠVADOS IR APIBENDRINIMAI .....	60
INFORMACINIŲ ŠALTINIŲ SĄRAŠAS .....	61



## **SANTRAUPŲ IR TERMINŲ ŽODYNAS**

CSI – skrydžio ciklai nuo paskutinį kartą atlikto kapitalinio variklio remonto

CSN – skrydžio ciklai nuo variklio pagaminimo

TSI – skrydžio valandos nuo paskutinį kartą atlikto kapitalinio variklio remonto

TSN – skrydžio valandos nuo variklio pagaminimo

SB – aptarnavimo biuletenis

LPC – žemo slėgio kompresorius

HPT – aukšto slėgio turbina

LPT – žemo slėgio turbina

AGB – priedų pavaros dėžė

N1 – žemo slėgio sistemos velenas

N2 – aukšto slėgio sistemos velenas

MIDSHAFT – centrinis velenas N1

FAA – Federalinė aviacijos agentūra

FPR – turboventiliatorinio variklio ventiliatoriaus pakopos koeficientas

CPR – kompresoriaus slėgio koeficientas

BR – turboventiliatorinio variklio oro masės praėjimo pro variklio šerdį bei išorinį kontūrą santykis

ECU – variklio valdymo blokas

## PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Reaktyvinio variklio sudedamos dalys.....	4
1.2 pav. Scheminis variklio „CF6-80E“ pagrindinių tiriamųjų konstrukcinių sistemų ir elementų išdėstymas .....	7
1.3 pav. „CF6“ variklio kairė pusė.....	11
1.4 pav. „CF6“ variklio dešinė pusė .....	11
1.5 pav. Korpuso dalių darbo temperatūros grafikas .....	12
1.6 pav. Išimtas priekinis velenas .....	18
1.7 pav. Centrinis velenas .....	18
1.8 pav. Žemo slėgio turbina ir veleno mazgo padėtis.....	19
1.9 pav. Galinis 6R guolio karterio mazgas ir guolio dalies kurioje išdėstyti ritiniai surinkimo schema.....	21
1.10 pav. Alyvos bako, padavimo filtro ir siurblių padėtis „CF6-80E“ variklyje.....	22
1.11 pav. Traukos guolis 1B .....	23
1.12 pav. Ritininis guolis 2R.....	23
1.13 pav. Centrinio veleno ir žemo slėgio turbinos rotoriaus mazgas ir konstrukcijos padėtis variklyje .....	24
1.14 pav. „CF6-80E“ variklio 6R guolio ir galinio karterio konstrukciniai elementai ir surinkimo schema.....	25
1.15 pav. Guolio užtvirtinimo konstrukcinio mazgo elementų išdėstymas .....	25
1.16 pav. „CF6-80E“ variklio 6R guolio žiedo briaunos pažeidimas .....	27
1.17 pav. Pavyzdys-1. Pažeistas guolio veržlės tarpinis žiedas su užraktu.....	27
1.18 pav. Pavyzdys-2. Pažeistas guolio veržlės tarpinis žiedas su užraktu.....	28
2.1 pav. Pritvirtinto hidraulinio preso prie žemo slėgio kompresoriaus pagrindinio disko .....	31
2.2 pav. Veržlės poslinkis .....	32
2.3 pav. Ritininis guolis 6R. Pagrindinės dalys ir matmenys reikalingi patikrai atlikti.....	33
2.4 pav. N1 veleno galinės dalies matmenys patikrai atlikti.....	33
2.5 pav. Nustatyti guolio vidinio žiedo poslinkiai .....	34
2.6 pav. Centrinio veleno Nr. 6 guolio veržlė ir jos konstrukcija .....	39
2.7 pav. Nr.6 guolio tvirtinimo mazgo elementų išdėstymo tvarka .....	40
2.8 pav. Veleno Nr.6 guolio ir veržlės mazgo surinkimas .....	41
2.9 pav. Guolio Nr.6 veržlės tarpinio žiedo su užraktu modelis .....	45

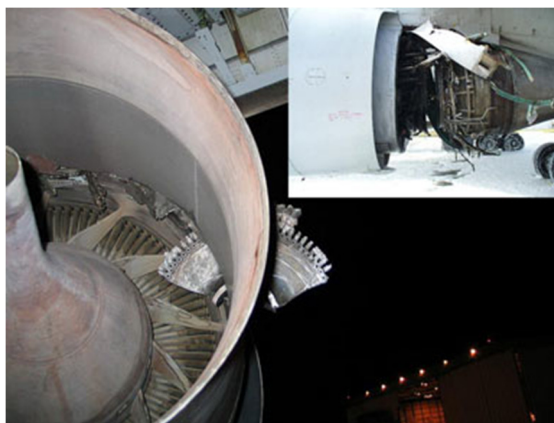
2.10 pav. Tarpinį žiedą veikiančios jėgos ir įtvirtinimo vietos prie veržlės.....	46
2.11 pav. Jėgos veikiančios tarpinį žiedą veržlės atsisukimo metu .....	46
2.12 pav. Veržlės tarpinio žiedo poslinkiai atsisukimo metu.....	47
2.13 pav. Veržlės atsisukimo metu tarpinio žiedo deformacijos.....	47
2.14 pav. Originalus tarpinis žiedas su dviem užraktais ir jį veikiančios jėgas veržlės atsisukimo metu.....	48
2.15 pav. D karterio dangtelis ir pjūvis .....	49
2.16 pav. Sumodeliuotas D karterio alyvos sandarinimo ir paskirstymo dangtelis .....	49
2.17 pav. D karterio alyvos sandarinimo dangtelį veikiančios jėgos .....	50
2.18 pav. D karterio alyvos sandarinimo dangtelio deformacijos.....	50
3.1 pav. Variklio darbo temperatūrų analizė.....	58

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. „CF6-80“ variklių modelių specifikacijos.....	8
1.2 lentelė. Vidutinės variklio darbo temperatūros .....	12
1.3 lentelė. Intervalai – variklių standartinių aptarnavimų.....	14
1.4 lentelė. „CF6-80E“ variklio modelio parametrai .....	16
2.1 lentelė. Veleno bandymo rezultatai.....	31
2.2 lentelė. Tyrimo metu surinkti guolio patikros duomenys .....	34
2.3 lentelė. Cheminė medžiagos AMS 510 321 elementų pasiskirstymas.....	35
2.4 lentelė. 17-4P A286 medžiagos cheminė sudėtis .....	36
2.5 lentelė. Medžiagų šiluminio plėtimosi koeficientai .....	38
2.6 lentelė. Veržlės bendriniai duomenys .....	38

## IVADAS

Projekte daugiausia dėmesio skiriama civilinių orlaivių variklių saugos, patikimumo ir ilgaamžiškumo bei konstrukcijos klausimams. Jau 1960 m. turboventiliatorinio variklio tipas tapo pagrindiniu ir plačiausiai naudojamu civilinės aviacijos orlaiviuose. „General Electric“ yra viena didžiausių komercinės paskirties orlaivių variklių gamintojų pasaulyje. Kompanija, rūpindamasi aviacijos sauga, yra paskelbusi pranešimą variklių operatoriams ir išleidusi techninės priežiūros procedūrų dokumentą, prašantį atlikti papildomus variklio patikrinimus vienam iš šio gamintojo variklio modelių, siekiant užtikrinti saugų variklių naudojimą skrydžio metu. Dar prieš daugiau nei penkerius metus buvo susidurta su variklio konstrukcinio mazgo gedimo problema. Problema glaudžiai susijusi su vienu iš variklio vėlu ir guoliu. Tačiau jau ilgą laiką nepavyksta išspręsti šios problemos, kuriai daug dėmesio skiria tiek variklių techninės priežiūros organizacijos, tiek ir šių variklių gamykla. Šiuo magistro darbu siekiama išspręsti minėtą problemą, kuri padėtų išvengti kritinių įvykių skrydžių metu. Kaip panašaus incidento pavyzdys, skrydžio metu iš Paryžiaus į Los Andželo miestą skridusio orlaivio vieno iš variklių „CF6-80“ trūkęs aukšto slėgio turbinos diskas, vos nelėmė pražūtingos katastrofos (žr. nuotraukoje).



„CF6-80“ turboventiliatorinio variklio trūkęs aukšto slėgio turbinos diskas

Šiame baigiamajame magistro darbe išnagrinėti „GE CF6-80“ modelio reaktyviniai varikliai, kurie naudojami civilinėje aviacijoje transatlantinių skrydžių orlaiviams. Reaktyvinis variklis susideda iš atskirų modulių, kurie sudaro variklio sistemą. Kiekvienas modulis susideda iš daugelio skirtingų konstrukcinių elementų ir mazgų. Nuo kiekvieno mazgo ir elemento labai priklauso variklio darbas, ar variklis dirbs darniai, patikimai bei ilgaamžiškai. Tam tikslui turi būti užtikrintas didelis variklio elementų tikslumas, kad neįvyktų kritinė klaida, kelianti pavojų saugumui. Nedidelis netikslumas arba klaida gali turėti įtakos konstrukciniams variklio pažeidimams, kelti pavojų skrydžio saugumui ir blogiausiu atveju, lemti žmonių žūtis.

Remiantis praktikoje randamais variklių gedimais ir literatūra, darbe išnagrinėtos variklių konstrukcijos, jų modifikacijos, surinkimo ir eksploataavimo praktika. Daugiausia dėmesio skiriama velenams ir guolių sistemoms, velenų tvirtinimo mazgams. Darbe išspręsta „GE CF6-80E“ variklio veleno guolio tvirtinimo mazgo konstrukcijos problema ir pasiūlyti sprendimo būdai. Išaiškinti problemos atsiradimo požymiai, susiję su guolio veržlės atsikusimo procesais. Panaudojus „SOLIDWORKS“ programine įranga sumodeliuoti veleno galinio karterio konstrukciniai elementai – veržlė, poveržlė ir užrakinimo elementas. Projekte taip pat atlikti šių elementų stipruminiai skaičiavimai – nustatyti konstrukciniuose elementuose atsiradę įtempiai, deformacijos ir poslinkiai. Atlikto tyrimo, modeliavimo ir skaičiavimų, rezultatai pateikti išvadose ir apibendrinimuose.

Darbo tikslas:

Atlikti reaktyvinio variklio „CF6-80E“ veleno mazgo inžinerinį tyrimą, pateikti veleno tvirtinimo problemos sprendimo būdus, sukurti naujus elementus esamai konstrukcijai, atlikti atsparuminius skaičiavimus bei nustatyti variklių darbo temperatūrų normas ir leistinus ciklus.

Darbo uždaviniai:

- atlikti reaktyvinių variklių techninę ir eksploatacinę analizę;
- pagrįsti variklio veleno tvirtinimo mazgo problemos svarbą;
- atlikti variklio žemo slėgio sistemos veleno mazgo tyrimą;
- nustatyti ir parinkti tinkamiausias medžiagas mazgo elementams;
- sumodeliuoti veleno tvirtinimo mazgo elementus ir atlikti atsparuminius skaičiavimus;
- nustatyti variklio darbo temperatūras kilimo metu;
- nustatyti variklio leistinus darbo ciklus.

# 1. REAKTYVINIO VARIKLIO KONSTRUKCINĖ IR EKSPLOATACINĖ ANALIZĖ

Civilinėje ir komercinėje aviacijoje labiausiai paplitę ir yra naudojami - turboreaktyviniai varikliai. Analizė apima turboventiliatorinių reaktyvinių variklių sistemų, konstrukcinių mazgų ir eksploatacinių parametrų aprašymus. Sistema – tai skirtingų elementų sąsaja, išskirianti juos bendrai kaip vientisą iš esmės savarankišką darinį[5]. Ryšiai tarp atskirų variklio sistemos elementų yra labai sudėtingi, pakitus kuriam nors vienam elemento parametrui, pasikeičia ir kitų elementų parametrai, svarbu paminėti, kad ir pakinta ryšiai tarp pačių elementų.

Sistemos analizės pagrindą sudaro tai, kad atskiros problemos sprendžiamos turint tikslą išspęsti didesnę, visai sistemai bendrą ir svarbią įtaką turinčią, susidariusią problemą[5]. Todėl analizėje nuosekliai tiriami variklių modeliai, parametrai ir sistemos, konstrukciniai mazgai, konstrukcijų elementai bei eksploatacija. Viskas glaudžiai susiejama su sutinkama problema.

Pagrindiniai technologinio ir eksploatacinio lygio analizės darbo tikslai bei uždaviniai:

- reaktyvinių variklių veikimo principas, konstrukcinės sistemos ir parametrai;
- išsami „CF6-80“ variklių sistemų, mazgų ir eksploatacinė analizė;
- variklių leistinų ribų aprašymai;
- žemo ir aukšto slėgio velenų sistemos;
- veleno tvirtinimo mazgai;

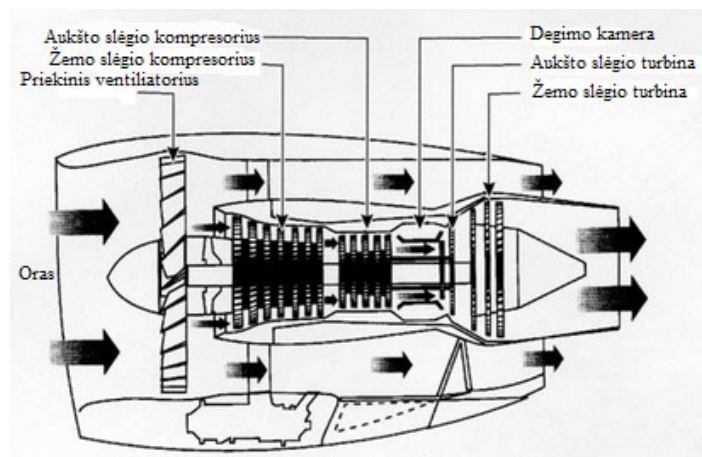
Svarbiausi sistemų analizės principai – kruopščiai ir visapusiškai išnagrinėti uždavinį. Šios analizės pagrindinis uždavinys – variklių sistemų ir eksploatacijos tyrimas glaudžiai susietas su iškilusia veleno tvirtinimo mazgo problema. Todėl šiam uždaviniui ištirti labai svarbu surinkti reikiamą medžiagą ir ją išnagrinėti, kadangi vėliau analizė bus panaudota kituose darbo etapuose.

Ši analizė glaudžiai siejasi su praktika, atlikta kompanijoje, kurioje atliekama nuodugni reaktyvinių variklių techninė priežiūra. Atlikti „GE CF6-80E“ variklių darbai yra tiesiogiai susieti su projekto tiriamu objektu, ieškant sprendimo iškilusiai problemai ir skiriant daugiau dėmesio aviacijos saugai.

## 1.1 Turboventiliatorinis reaktyvinis variklis, veikimo principas ir konstrukcinės sistemos

Turboventiliatorinis variklis - vienas iš reaktyvinių variklių tipų. Priekinėje ventiliatoriaus modulio dalyje, priešais žemo slėgio kompresorių-busterį, yra didelis ventiliatorius, kuris padidina viso variklio efektyvumą ir naudingumą, bei sumažina kuro sąnaudas. Ventiliatoriaus sukuriama traukos dalis išoriniame sraute, priklausomai nuo variklio, siekia apie daugiau nei 80 %. Kita dalis, kuri prateka pro kompresorių, degimo kamerą ir aukšto bei žemo slėgio turbinas, ir išeina pro išmetimo tūtą sukuria likusią apie 20 % traukos dalį. Taip pat tokio tipo varikliai gali būti apibrėžiami kaip dvikontūriai. Dvikontūriai varikliai, kai abiejų kontūrų, išorinio ir vidinio, santykis 5:1 priskirti didelio dviejų kontūro santykio varikliams.

Reaktyvinio variklio veikimo principas – oras įsiurbiamas pro variklio oro įsiurbimo angą priekyje, ventiliatoriaus modulyje (turboventiliatoriniuose varikliuose), toliau suspaudžiamas kompresoriaus-busterio, žemo slėgio ir vėliau perduodamas į aukšto slėgio kompresorių-variklio šerdį. Toliau suspaustas oras patenka į degimo kamerą kur jis maišomas su kuru. Didelio slėgio karštos dujos toliau keliauja per variklio aukšto slėgio turbiną, kuri vėlu yra sujungta su kompresoriumi. Dalis energijos yra sunaudojama sukuti žemo slėgio turbinos menteles, kurių pagalba sukamas velenas sujungtas su ventiliatoriumi. Karštos dujos keliaudamos per žemo slėgio turbinos menteles išsiplečia, sumažėja slėgis, oro greitis ir temperatūra - tokiu būdu energija yra gaunama turbinai sukuti. Itin didelio greičio dujų srovė yra pašalinama per išmetimo tūtą [2].



1.1 pav. Reaktyvinio variklio sudedamos dalys [14]



1.1 pav. pavaizduotos pagrindinės konstrukcinės variklio sistemos. Pagrindinės sudedamos dalys: priekinis ventiliatorius, toliau žemo ir aukšto slėgio kompresoriai, kuriuose kaip pateikta anksčiau veikimo principu, oras suspaudžiamas ir perduodamas į degimo kamerą. Galinėje variklio dalyje išdėstytos aukšto ir žemo slėgio turbinos. Dažniausiai apatinėje variklio dalyje arba prie ventiliatoriaus modulio korpuso yra reaktyvinio variklio priedų pavaros dėžė.

Ventiliatoriaus modulis padeda padidinti oro srauto greitį prieš kompresorių bei nukreipti oro masę. Priklausomai nuo variklio gamintojo ir modelio, ventiliatorius gali būti iki 3 m. skersmens. Ventiliatorius tarp atliekamų techninių aptarnavimų gali būti eksploatuojamas keletą tūkstančių skrydžio valandų arba daugiau nei 500 ciklų.

Kompresoriaus moduliai, ypač aukšto slėgio kompresorius, turi būti atsparūs aukštai temperatūrai, nes suspaustas oras įkaista iki 540 C. Žinoma, turi pasižymėti atsparumu įvairioms vibracijoms, dulkėms bei smėliui kuris patenka tiesiogiai iš ventiliatoriaus[2].

Suspaustas oras aukšto slėgio kompresoriuje patenka į degimo kamerą. Degimo kameroje kuras maišomas su suspaustu oru ir uždegamas. Temperatūra pakyla iki 1700 K[2]. Degimo kamera reaktyviniuose turboventiliatoriniuose varikliuose būna žiedinė. Kuro suvartojimo efektyvumui daug įtakos turi degimo kameros purkštukai, kaip efektyviai kuras išpurškiamas ir sudeginamas. Uždegimo žvakės – dvi. Purkštukų kiekis dažnai priklauso nuo variklio modelio, gali siekti 16 ir daugiau.

Už degimo kameros išdėstytos aukšto slėgio ir žemo slėgio turbinų moduliai. Turbinų mentelės turi atlaikyti itin didelio karščio ir slėgio dujų srautą kuris ateina tiesiai iš degimo kameros. Turbinos mentelės yra aušinamos suspaustu oru. Oras mentelėms aušinti yra gaunamas iš žemo slėgio kompresoriaus velenų sistemos pagalba. Dalis suspausto oro iš kompresoriaus yra skirta ir aušinti degimo kamerą ir turbiną iš išorės, nes šioje dalyje variklis pasiekia aukščiausią temperatūrą.

Toliau žemo slėgio turbina skirta sukuti ventiliatorių ir tuo pačiu žemo slėgio kompresorių. Koeficientas kuris gaunamas lyginant oro srauto kiekį, kuris pratekėjo pro vidinį ir kuris pro išorinį kontūrą, vadinamas variklio oro aptekėjimo koeficientu. Nurodo kiek kartų oro daugiau aptekėjo variklio išorinį kontūrą nei pateko į kompresorius.

Tarpusavyje sujungtas variklio sistemas į bendrą visumą apjungia vamzdiniai, komponentai bei jų laikikliai, variklio valdymo įtaisai, jutikliai. Kiekvienas variklis yra valdomas pagrindinio kompiuterio vadinamo ECU.

## 1.2 „CF6“ variklių sistemos ir eksploatacija

Projekte atliktas tyrimas yra tiesiogiai susietas su „General Electric“ gamintojo reaktyviniais varikliais. „General Electric“ yra viena iš didžiausių lėktuvų variklius ir jų komponentus teikiančių kompanijų. Pagrindiniai konkurentai variklių rinkoje šiuo metu yra „Rolls-Royce“ ir „Pratt & Whitney“. Bendrovė gamina daugiau nei pusę pasaulio eksploatuojamų orlaivių variklių, iš jų transatlantiniams, komerciniams, karo lėktuvams, sraigtasparniams. Todėl labai svarbu atkreipti dėmesį variklių patikimumo užtikrinimo klausimus, kurie glaudžiai susieti su orlaivių sauga ir žmonėmis.

Tyrimo objektas – „CF6-80“ variklio modelis. CF6 serijos turboventiliatorinio variklio ventiliatoriaus mazgas turi vienos pakopos ventiliatorių (ilgų mentelių) ir papildomą paslegiantį kompresorių (trumpų mentelių antrą pakopą). Buserinė pakopa yra mažo žemo slėgio kompresorius, reikalingas suslėgti tą oro srauto dalį kuri įteka į aukšto slėgio kompresorių[2]. Dažniausiai sutinkami du šio variklio modelio tipai. Naujesnis „CF6-80E“ ir senesnis „CF6-80C2“ varikliai. Šie variklių modeliai dažniausiai naudojami orlaivių kurie atlieka transatlantinius skrydžius. Naudojami orlaiviuose, tokiuose kaip „Boeing 747“ ir „Airbus A330“.

### „CF6“ variklių konstrukcinės sistemos

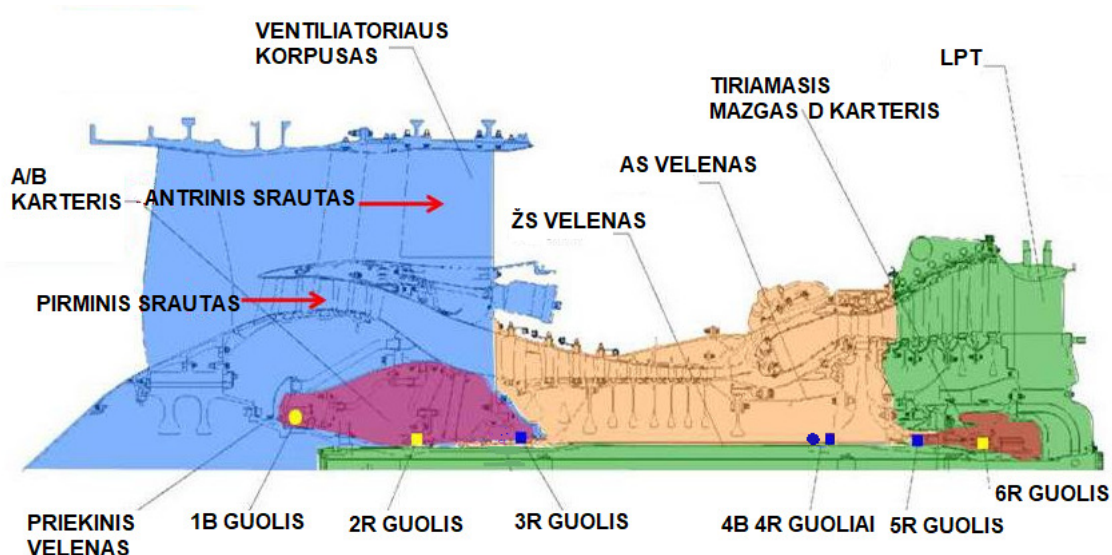
Varikliai „CF6-80C2“ ir „CF6-80E“ kaip ir kiti reaktyviniai varikliai sudaryti ir konstrukcinių sistemų, komponentų ir vamzdinių išdėstytų ant tarpusavyje sujungtų variklio modulių. „CF6“ serijos variklio ventiliatoriaus mazgas turi vienos pakopos ventiliatorių (ilgų mentelių) ir papildoma suslegiančią buserio dalį, sudaryta iš 4 pakopų žemo slėgio kompresoriaus[17]. Toliau rikiuojasi 14 pakopų aukšto slėgio kompresorius. Šios serijos varikliuose naudojamos tik ašinio tipo turbinos. Per šio tipo turbinas galima perleisti didesnės masės dujų srautą[17]. Viena paskui kitą išrikiuotos dviejų ir penkių pakopų turbinos. Kompresoriaus pakopų skaičius, energijos kiekis, kuris turi būti paimtas iš karštų dujų, sukimosi greitis ir didžiausias leidžiamas turbinos skersmuo – pagrindiniai faktoriai, kuriais remiamasi, nustatant turbinų pakopų skaičių[2]. Žemiau išvardinti pagrindiniai variklio moduliai ir skyriai.

Pagrindiniai variklio moduliai pagal eiliškumą nuo priekio ir jų konstrukcinės padėties numeracija (0\_X):

- 01X ventiliatoriaus modulis (angl. Fan);
- 06X žemo slėgio kompresoriaus modulis LPC (angl. Low Pressure Compressor);
- 02X aukšto slėgio kompresoriaus modulis (angl. High Pressure Compressor) ir degimo kamera (angl. Combustor);

- 03X aukšto slėgio turbinos modulis HPT (angl. High Pressure Turbine Module).
- 04X žemo slėgio turbinos modulis LPT (angl. Low Pressure Turbine Module).
- 05X priedų pavaros dėžė AGB (angl. Accessory Drive Module) priskiriamas kaip atskiras variklio modulis.
- 07X centrinis variklio velenas.

Kiekviena variklio sistema vėliau skirstoma į atskirus poskyrius. 02X konstrukcinė sistema (*angl. core*) susideda iš šių elementų: aukšto slėgio kompresoriaus, degimo kameros ir aukšto slėgio turbinos. Dažniausiai jei tai ne išskirtinis projektas, kada nuo variklio reikia nuimti aukšto slėgio turbiną ir atlikti tik degimo kameros remontą, variklio išrinkimo ir surinkimo linijoje, visada pilnam techniniam aptarnavimui numontavus žemo slėgio turbiną, visi anksčiau paminėti trys moduliai sujungti tarpusavyje nuimami kaip vienas elementas. Atlikti darbo procedūras su aukšto slėgio kompresoriumi, degimo kamera ir aukšto slėgio turbina ir paprasčiau ir patogiau atjungus visus modulius kaip vientisą elementą. Darbai prie variklio atliekami tiek esant varikliui horizontalioje padėtyje tiek ir vertikaliajoje. Pagrindiniai surinkimo ir išrinkimo darbai ir užduotys atliekamos horizontalioje padėtyje tam skirtuose stenduose. Horizontaliai padėčiai variklio tvirtinimo taškai prie stendo (pilnai surinktas) išdėstyti priekyje ant ventiliatoriaus modulio ir gale ant žemo slėgio turbinos. Jei numontuojama žemo slėgio turbina kaip papildomas tvirtinimas yra naudojamas taškas tarp aukšto slėgio kompresoriaus ir degimo kameros. 02X sistemos remonto darbai jau atliekami vertikaliajoje padėtyje.



**1.2 pav.** Scheminis reaktyvinio variklio „CF6-80E“ pagrindinių tiriamųjų konstrukcinių sistemų ir elementų išdėstymas. Schemoje pažymėti pagrindiniai variklio guoliai ir karteriai (guoliai: 1B, 2R, 3R, 4R 4B, 5R, 6R. karteriai: A/B, D SUMP)

1.1 lentelėje pateiktos „C2“ ir „E“ variklių techninės charakteristikos. Pagal charakteristikas nustatyti pagrindiniai šio tipo variklių modelių techniniai skirtumai.

**1.1 lentelė.** „CF6-80“ variklių modelių specifikacijos ir eksploataciniai duomenys [17].

Modelis	CF6-80C2	CF6-80E
Tipas	Du velenai, aukšto pratekėjimo turboventiliatorinis, žiedinė degimo kamera	
Kompresorius	Ventiliatorius ir 4 ŽS + 14 AS	
Turbina	2 AS + 5 ŽS	
Ilgis	168 in (427 cm)	
Skersmuo	106 in (269 cm)	114 in (290 cm)
Trauka pakilimo metu	52.200-61.960 lbf 232.2-275.6 kN	65.800-69.800 lbf 293-310 kN
Suspaudimo laipsnis	27.1-31.8	32.4-34.8
Aptekos koeficientas	5-5.31	5-5.1
Maksimali galia TSFC	0.307-0.344 lb/lbf/h 8.7-9.7 g/kN/s	0.332-0.345 lb/lbf/h 9.4-9.8 g/kN/s
Naudojami orlaiviuose	A300/310, B747-400, B767, MD-11	A330
Svoris	9 480-9 860 lb 4 300-4 470 kg	11 225 lb 5 092 kg
Didžiausi apsisukimai ŽS	3 854	3 835
Didžiausi apsisukimai AS	11 055	11 105
Traukos-Svorio koeficientas	5.51-6.28	5.86-6.22

1.1 lentelės paaiškinimai:

ŽS – žemo slėgio, angl. LP low pressure.

AS- aukšto slėgio, angl. HP high pressure.

TSFC – angl. thrust specific fuel consumption, Specifinis traukos - kuro suvartojimo rodiklis. Nurodo kuro kiekį reikalingą suteikti reikiamą trauką tam tikram laiko tarpui, periodui. Pavyzdys lb/(h·lbf) arba g/(s·kN) gramai padalinti iš sekundžių-kilo Niutonų)

Traukos – svorio koeficientas – angl. Thrust-to-weight ratio.

„C2“ ir „E1“ variklių konstrukcijos susideda iš tų pačių elementų, sudaro tie patys moduliai, du velenai, žiedinė degimo kamera, kompresoriai ir turbinos turi tokį patį pakopų skaičių. Tačiau dėl padidinto variklio skersmens, E1 variklio maksimali galia ir TSFC yra kur kas didesnė nei C2 modelio ir nors

padidėjęs variklio svoris, traukos-svorio koeficientas išlieka didesnis. Jei naudojama maksimali galia patiriamos didesnės apkrovos ir skirtinga įtaka variklių velenams.

Svarbu paminėti, kad kiekvienas variklis gali turėti pateikiamą ne vieną skirtingą modifikaciją priklausomai nuo užsakovo ir orlaivio tipo reikalavimų. Variklio modifikacija nurodoma tiek prie variklio lentelės kurioje nurodytas variklio modelis tiek variklio dokumentacijoje, kadangi tai labai svarbu dėl techninės dokumentacijos ir variklių priežiūros. Kaip pavyzdys, modifikaciją nurodo paskutiniai skaitmenys ir raidės po variklio modelio: CF6-80E1\*\*\*\*\* . Gali būti CF6-80E1 B\*F\* ir panašios modifikacijų numeriai.

Pagrindiniai modifikacijų skirtumai:

- variklio trauka ir ECU (variklio kompiuterio) valdymas;
- variklio komponentai LRU ir jų išdėstymai, konstrukciniai tvirtinimai;
- priedų pavaros dėžės komponentai;
- techninės priežiūros procedūros;
- konstrukcinių mazgų modifikacijos;

Toliau pateikta „E1“ variklio konstrukcinės sistemos ir konstrukcinių mazgų analizė. Svarbu atkreipti dėmesį į žemo slėgio ir aukšto slėgio rotorinių konstrukcines sistemas, tačiau glaudžiau jos išanalizuotos sekančiuose skyriuose. Daugiau medžiagos pateikta apie guolių ant kurių sukasi velenai išdėstymą ir jų sandarą, apie guolių tepimą. „CF6-80E“ variklis yra aukšto pratekėjimo, dviejų kontūrų. Variklis sudeda iš ventiliatoriaus ir 4 pakopų žemo slėgio kompresoriaus. Toliau seka 14 pakopų aukšto slėgio kompresorius, žiedinė degimo kamera ir 2 pakopų aukšto slėgio turbina. Variklio gale 5 pakopų žemo slėgio turbina.

Variklį sudaro du rotorai, žemo slėgio ir aukšto slėgio rotorius. Žemo slėgio rotoriaus sandara yra iš ventiliatoriaus, žemo slėgio kompresoriaus rotorinių bei veleno N1. Aukšto slėgio rotorius iš aukšto slėgio kompresoriaus rotoriaus, N2 veleno, kuriuos suka aukšto slėgio turbina. Velenus N1 ir N2 laiko 7 pagrindiniai variklio guoliai iš jų 5 ritiniai(ašiniai) ir 2 rutuliniai(radialiniai). Guoliai 1B, 2R, 3R yra priekiniame karteryje, 4R ir 4B viduriniame, 5R ir 6R galiniuose karteriuose (žr. 1.3 pav.). Guolių tepimo sistema sudaryta iš: aukšto slėgio vamzdelių, alyvos siurblio, alyvos slėgio siūstuvo, variklio alyvos temperatūros jutiklio. Uždaru ciklu alyva paduodama į guolių karterius, A, B/C ir D karterius, vėliau iš jų per filtrus ir magnetinius detektorius sugrįžta atgal. Sistemos darbo metu nuolatos stebimas alyvos slėgis ir temperatūra.

### 1.3 „CF6-80E“ variklio ir velenų darbo parametrai

Reaktyvinio variklio darbas ir našumas nustatomas bei apibrėžiamas naudojantis variklio parametrais bei duomenis kurie surenkami aplink ir pačiame variklyje išdėstytais jutikliais ir kitais stebėsenos prietaisais. Be jutiklių ir kitų prietaisų variklį supa daug LRU komponentų. Tai tokie komponentai kurie gali būti be sudėtingesnių procedūrų ir prietaisų, kartais ir skubiai, paprastai nuimti nuo variklio ir pakeisti kitais. Tokie komponentai gali būti vožtuvai, reguliatoriai, variklio tvirtinimo prie sparno laikikliai ir kiti panašūs komponentai. Žemiau pateiktas „CF6-80E“ variklio jutiklių, komponentų skirtų atlikti variklio stebėseną ir surinkti visus galimus ir reikalingus parametrus, kad užtikrinti patikimą variklio darbą. Projektinės dalies tyrime panaudoti „EGT“ temperatūros zondų duomenys. Pateikta žemiau.

Jutikliai ir komponentai:

- N1 veleno akcelerometras;
- N2 veleno akcelerometras;
- N1 veleno atsarginis (alternatyvusis) akcelerometras;
- P/T2.5 sensorius/jutiklis;
- alyvos slėgio siūstuvai;
- variklio alyvos temperatūros jutiklis (TEO);
- „ps3“ jutiklis;
- kuro kiekio pratekėjimo siūstuvai;
- N1 apsisukimų daviklis;
- N2 apsisukimų daviklis;
- kuro temperatūros jutiklis;
- variklio karštų dujų temperatūros zondas (angl. EGT probe)

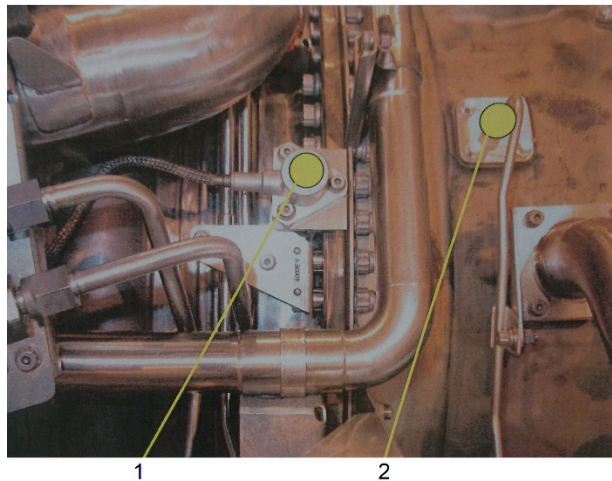
#### Jutikliai ir akcelerometrai

Kiekvienas variklis yra valdomas ECU (Engine Control Unit – variklio valdymo bloko), dviejų kanalų kompiuteriu esančiu kairėje variklio pusėje. Pilotų kabinoje dažniausiai centriniame monitoriuje pateikiamos pagrindinės variklių indikacijos:

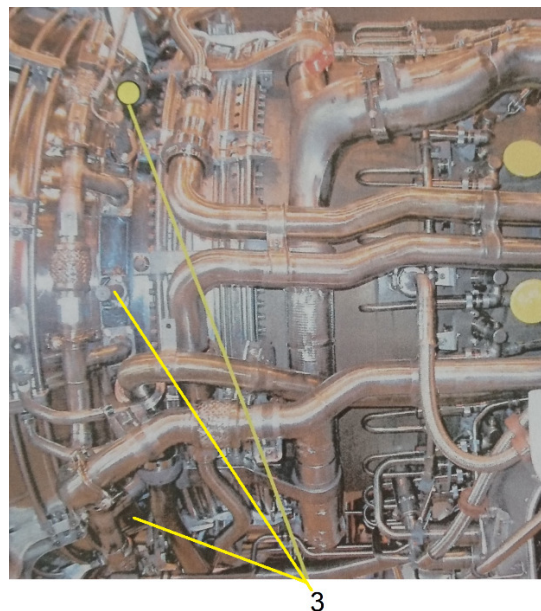
- išmetimo dujų temperatūra (dėl turbinų ir velenų tvirtinimo mazgų perkaitimo);
- velenų N1 ir N2 apsisukimai;
- vibracijos;
- slėgių indikacijos;

Akcelerometras - prietaisas, kuris išmatuoja pagreitį. Dauguma akcelerometrų nerodo pagreičio duomenų, o juos perduoda kitiems prietaisams. Vienašiai arba daugiašiai modeliai suranda vektoriaus normą, jo kryptį ir pagreitį kaip vektoriaus dydį. Tokie akcelerometrai turboventiliatoriniuose reaktyviniuose varikliuose naudojami vibracijoms išmatuoti.

**Pagrindinių tiriamojo veleno mazgo jutiklių padėtis „CF6“ variklyje.**

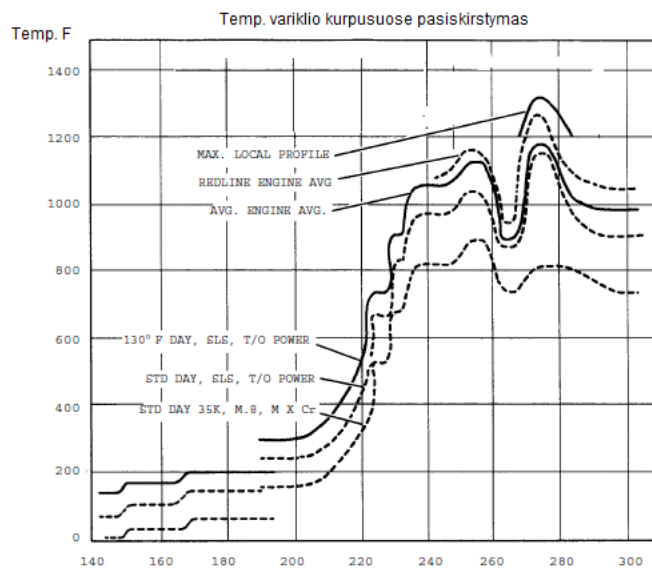


**1.3 pav.** „CF6“ variklio kairioji pusė. Matomas aukšto slėgio kompresorius arba variklio šerdies dalis (*CORE*). Akcelerometras veleno vibracijoms nustatyti (1). Jutiklis – temperatūros (2) pateikti degimo kameros temperatūros duomenis [18].



**1.4 pav.** „CF6“ variklio dešinė pusė. Nuotraukoje aukšto slėgio ir žemo slėgio kompresoriai. EGT temperatūros zondai (3) išdėstyti aplink turbinos korpuse. Surenka dujų temperatūros duomenis iš žemo slėgio turbinos. Surinkti duomenys siunčiami ir apdorojami ECU. Remiantis suteikiama šių jutiklių informacija nustatoma temperatūra veleno mazge [18].

## Variklio darbo temperatūrų diapazonai.



1.5 pav. Korpuso dalių darbo temperatūros grafikas[15]

Remiantis projekte pateiktu grafiku, 1.2 lentelėje nustatytos ir pateiktos kiekvieno variklio korpuso temperatūros darbo metu.

1.2 lentelė. Vidutinės variklio darbo temperatūros.

KORPUSAS	TEMP. K
Kompresorius	780
Kompresoriaus galinis korpusas	1600
HPT (aukšto slėgio turbinos)	1700
LPT (žemo slėgio kompresorius)	1000

Didžiausi leistini EGT (T49) duomenys.

Pakilimo metu ( 5 min) EGT	1787°F (975°C)
Didžiausias skrydžio tęstinumo EGT	1724 °F (940 °C)
Paleidimo (daugiausiai 40 sek.)	1598 °F (870 °C)
Antžeminio darbo	1382 °F (750 °C)

Didžiausi leistini rotorių sukimo greičiai.

N1 (ventiliatoriaus rotorius)	3, 835 RPM (115.5 procentų)
N2 (variklio aukšto slėgio sistemos – šerdies)	11, 105 RPM (113.0 procentų)



## 1.4 Variklio techninių charakteristikų leistinos ribos

Kiekvienas variklis turi savo charakteristikų leistinas ribas kurios dažniausiai nustatomas gamintojo. Taip pat yra nustatyti reikalavimai ir leistinos variklių darbo ribos aviacinio saugumo agentūrų siekiant užtikrinti variklio aukščiausio lygio patikimumą ir saugą. Kad nustatyti šias ribas turi būti analizuojamos variklio sistemos, mazgai ir atliekami su jais susiję bandymai.

Užtikrinti variklio patikimumą analizuojamos šios variklio sistemos ir posistemės, bei bandymai:

- funkcionavimas;
- saugumo ir patikimumo vertinimas/analizė;
- variklio kritinės dalys;
- stiprumas;
- kuro sistema;
- alyvos sistema;
- oro sistema, kompresoriaus ir turbinos suspaustas oras;
- užvedimo sistema;

Kita dalis išskiriama pagal bandymus ir kitas kritines variklio dalis bei komponentus:

- slėgio apkrovos;
- vibracijos;
- kuro slėgis ir temperatūra;
- variklio kalibravimo bandymai;
- variklio paleidimo bandymai;
- maksimalus variklio apsisukimų skaičius;
- kompresoriaus ir turbinos mentelių gedimas;
- kompresoriaus, turbinos ir ventiliatoriaus velenai;
- turbinos rotorius perkaitimas;
- išmetamųjų dujų temperatūros viršijimo bandymas;
- variklio perkaitimo bandymas;

Šių bandymų dėka dažnai aptinkami gedimai arba defektai dar neišleidus variklio eksploatacijai - skrydžiui. Tačiau šie bandymai gali padėti nustatant jau esamų problemų šalinimo sprendimus. Šio darbo atžvilgiu svarbi galimų veiksmų įtaką 6R guoliui galiniame karteryje. Kad neatsirastų kiti galimi defektai

ar neįvyktų kritiniai atvejai skrydžio metu, kas yra labai pavojinga ir kelia grėsmę žmonių saugumui, variklio sistemoms iškeliami gamintojų reikalavimai ir apribojimai:

- variklio apsisukimai, variklyje esančių dujų temperatūros indikacija;
- alyvos gamintojas ir tipas;
- kuro specifikacijos;
- hidraulinio skysčio specifikacijos;
- minimalus ir didžiausias leistinas kuro slėgis sistemoje;
- minimali ir didžiausia leistina kuro temperatūra;
- didžiausia leistina alyvos temperatūra;
- minimali alyvos temperatūra paleidimo metu;
- minimali alyvos temperatūra variklio paleidimo tuščia eiga metu ir didžiausiais sūkais;
- minimalus alyvos slėgis sistemoje;
- normalus alyvos slėgis varikliui veikiant maksimalia eiga;
- didžiausias leistinas turbinos apsisukimų skaičius RPM;
- didžiausias leistinas variklio sukimo momentas;
- didžiausia leistina variklio temperatūra ir laikas kurį gali būti;

Techniniai aptarnavimai yra nurodyti variklio skrydžio valandomis (EFH iš angl. Engine Flying Hours – Variklio Skrydžio Valandos), skrydžio ciklai (FC iš angl. Flight Cycles – Skrydžio Ciklai) arba orlaivio privalomos patikros aptarnavo intervalais. Kiekvienos procedūros aprašymai visada nurodomi pagal AMM (angl. aircraft maintenance manual – orlaivio techninės priežiūros vadovas) užduoties numerį. Techninės priežiūros užduotys išdėstytos sistemoje 72-00-00 poskyriu. Kai kurios išskirtinės, daugiau dėmesio reikalaujančios patikros pateikiamos Aptarnavimo Biuleteniais ir Tinkamumo skraidyti direktyvomis.

### 1.3 lentelė. Intervalai – variklių standartinių aptarnavimų

Patikra	Rekomenduojamas didžiausias intervalas
<b><u>Variklio standartinis aptarnavimas</u></b>	
Starterio alyva	500 EFH
Variklio tvirtinimo prie pilono mazgai	
Detali apžiūra ir variklio tvirtinimo varžtų patikra	Kiekvienas variklio montavimas
Priekinė tvirtinimo platforma ir kitos dalys	4100 FC
Galinio variklio tvirtinimo mazgo ir dalių patikra	8000 FC

<b>Patikra</b>	<b>Rekomenduojamas didžiausias intervalas</b>
<b><u>Ventiliatorius</u></b>	
Mentelių patikra	4500 EFH
Mentelių tvirtinimo vietų patikra ir tepimas	1000 FC
Vizuali patikra ventiliatoriaus modulio korpuso	4500 EFH
Vizuali patikra žemo slėgio kompresoriaus statoriaus	4500 EFH
<b><u>Aukšto slėgio kompresorius</u></b>	
BSI mentelių patikra (patikra boroskopu), mentelės ir jų dalis bei pakopa pagal aptarnavimo biuletinį	400 FC
<b><u>Degimo kamera</u></b>	
BSI	500 FC arba 2000 EFH (priklausomai kas pirmiau pasiekama)
<b><u>Aukšto slėgio turbina</u></b>	
BSI	500 FC arba 2000 EFH (priklausomai kas pirmiau pasiekama)
<b><u>Kuro sistema</u></b>	
Kuro filtro elementas	4500 EFH
Kuro sistemos tiekimo patikra	7500 EFH
<b><u>Degimo sistema</u></b>	
Uždegimo žvakių keitimas	500 FC
<b><u>Pneumatinė sistema</u></b>	
VBV hidraulinių cilindrų patikra	4500 EFH
VSV hidraulinių cilindrų patikra	4500 EFH
<b><u>Tepimo sistema</u></b>	
Magnetinio detektoriaus patikra	600 EFH
Tepimo sistemos alyvos siurblių filtrų patikra	4500 EFH

Paaiškinimai:

FC – *Flight Cycles*: skrydžio ciklai. Vieną ciklą sudaro vienas pakilimas ir nusileidimas.

EFH – *Engine Flight Hours*: Variklio skrydžio valandos. Laikas kurį variklis buvo eksploatuojamas, valandomis.

Lentelėje neišskirti duomenys apie velenų didžiausius leistinus intervalus iki privalomosios patikros. Velenams apžiūra ir remontas atliekamas po nustatyto variklio ciklų skaičiaus. Priklausomai nuo veleno dalies numerio, priklausomai kada ir kokios modifikacijos velenas buvo išleistas - skrydžių ciklų nustatytos ribos skirtingos. Toliau darbe pateikti velenų intervalai.

Žemo slėgio veleno sistemos didžiausi leistini intervalai:

Veleno dalies numerio pabaiga P05-P12	12 200 EFC
Veleno dalies numerio pabaiga M39P01-P02	8400 EFC
Veleno dalies numerio pabaiga M39P03-P04	14 800 EFC

### Velenų apsisukimų leistinos ribos

Žemiau 1.4 lentelėje pateikiami parametrai, variklio velenų apsisukimų, traukos ir temperatūros.

**Lentelė 1.4** „CF6-80E“ variklio modelio parametrai[30]

Traukos lygis N1 (RPM)	Temperatūra °F (°C)	Riba	Stand. diena				Karšta diena	
			Trauka lbs	EGT °F (°C)	Aukšto slėgio sistemos (CORE) RPM	Kuro pratekėjimas PPH	EGT °F (°C)	CORE RPM
Pakilimo metu (3481)	86 (30)	MAX	66775	1638 (892)	10601	23737	1740 (949)	10869
		MIN	64530	1522 (828)	10257	22001	-	-
Maksimalus tęstiniai (3383)	77 (25)	MAX	62874	1598 (870)	10626	21910	1665 (907)	10805
		MIN	60400	1476 (802)	10140	20126	-	-

Paaiškinimai:

EGT – išeinančių dujų iš turbinos temperatūra (angl. k. Exhaust Gas Temperature)

PPH – kuro suvartojimą apibrėžiantis dydis, iš angl. k. Pound Per Hour (svarai per valandą)

Standartinė diena (angl. k. standard day) – 59 °F arba 15 °C

## 1.5 Variklio guoliai ir velenų sistemos

Inovacinis turboventiliatorinio variklio sprendimo principas, įmontavus ventiliatoriaus pakopą priekyje, „General Electric“ kompanijos buvo plėtojamas jau 7-ajame dešimtmetyje. Turbina ir ventiliatorius sudarė vieną mazgą.[2] Turbinos ir ventiliatoriaus mazgą galima pateikti kaip sistemą. Ir ši sistema gali sukintis laisvai ir nepriklausomai nesant mechaninių jungčių su aukšto slėgio sistemos variklio dalimi - šerdimi.

Variklis „CF6-80E“ sudarytas ir dviejų pagrindinių sistemų, aukšto slėgio ir žemo slėgio. Kaip ir buvo aprašyta anksčiau taip ir šio modelio variklio žemo slėgio sistema sudaryta iš ventiliatoriaus, busterio ir žemo slėgio turbinos gale. Ši sistema sukasi ant N1 veleno. Aukšto slėgio sistema (variklio šerdis) sudaryta iš aukšto slėgio kompresoriaus, viduryje degimo kameros ir gale aukšto slėgio turbinos. AS sistema naudojami N2 velenai. N2 rotorius atremtas ant keturių guolių, trys iš jų ritiniai (3R, 4R ir 5R guoliai) ir vienas rutulinis (4B guolis).

Projekte didžiausias dėmesys skirtas žemo slėgio sistemos veleniui ir jo konstrukciniams mazgams. Priekinio veleno, centrinio veleno, turbinos rotorius, velenų guolių, tvirtinimo mazgų bei jų kritinėms vietoms.

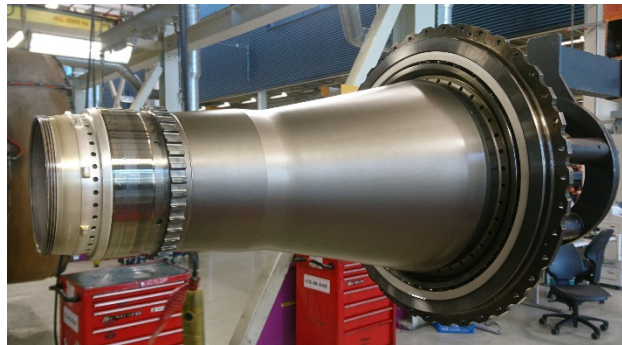
Ventiliatoriaus aeroelastinis dizainas leidžia jam atlaikyti krūvius, iki 120 procentų viršijančius jo nustatytą apsisukimų greitį, tai vienas iš FAA reikalavimų [2]. Priekinis ventiliatoriaus rotorius diskas turi atlaikyti visas jam tenkančias apkrovas. Kad diskas būtų patikimas, jo gamybai pasirinktas titanas, nes jo geriausias įtampos ir svorio santykis ir labiausiai atitinka saugomo reikalavimus[2].

Rotoriaus diskui tenkantys krūviai[2]:

- išcentrinės rotorius jėgos;
- ašinės ir lenkimo jėgos, sukeltos aerodinaminių apkrovų;
- vibracijų įtempiai;

Ventiliatoriaus rotorius mazgas atremtas ant dviejų guolių. Pirmas priekinis guolis yra rutulinis traukos guolis. Antras guolis yra ritinis, skirti atlaikyti ašinės apkrovas. Ventiliatoriaus rotorius priekiniame mazge sujungtas su priekiniu veleniui. Svarbu paminėti, kad priekinis velenas (1.6 pav.) yra N1 veleno dalis. N1 velenas susideda ir pagrindinių dviejų dalių: priekinio veleno ir centrinio - vidinio veleno.

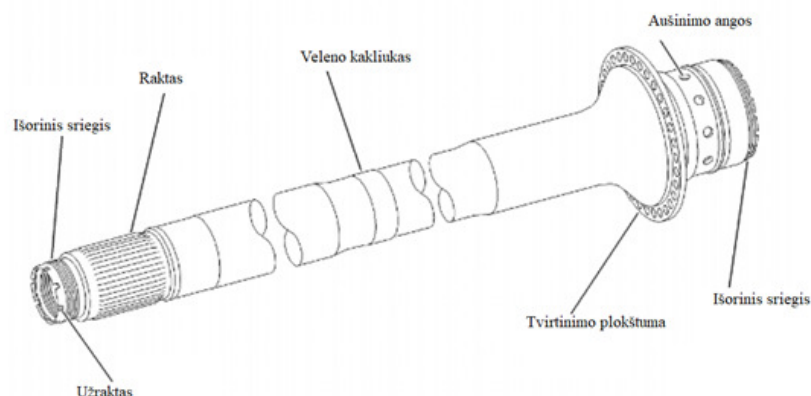
Priekinis velenas sujungiamas su centriniu velenu sujungiant velenų raktus ir užsukant jungiančiuoju varžtu ir išorine veržle (1.7 pav.).



**1.6 pav.** Išimtas priekinis velenas (*angl. k. forward shaft*) su pirmo numerio traukos guoliu ir antro numerio slydimo guolio vidine dalimi.

Centrinį veleną sudaro priekinės dalies mazgas, išorinis ir vidinis sriegis bei raktas, skirtas sujungimui ir užtvirtinimui su priekiniu velenu. Veleno kakliukas skirtas sustiprinti velenui. Galinėje dalyje yra veleno tvirtinimo plokštuma sujungimui su žemo slėgio turbinos rotoriumi ir išorinis sriegis sujungimui šešto numerio slydimo guolio tvirtinimui.

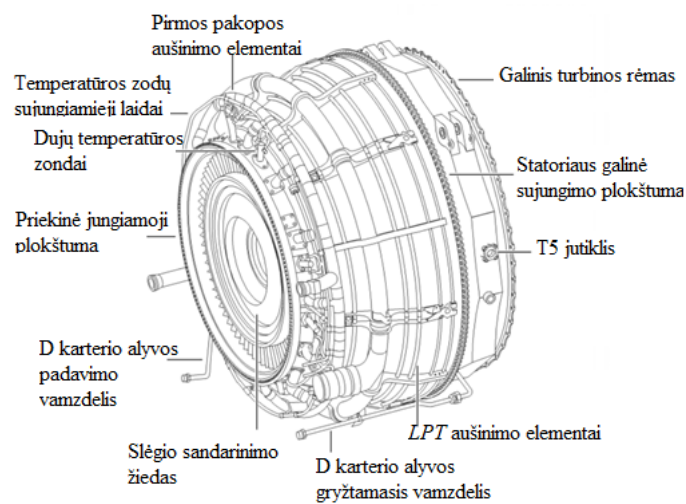
Centrinis (*midshaft*) velenas aušinamas oru iš ventiliatoriaus modulio. Sudėtingos konstrukcijos aušinimo sistema tiekia orą nuo iš ventiliatoriaus pakopos į veleno centrinę dalį. Veleno aušinimas reikalingas dėl staiga išaugančios aukštos temperatūros variklio gale, prie centrinio veleno pabaigos, kur velenas kartu sujungtas su turbinos rotoriumi.



**1.7 pav.** Centrinis velenas (*mid-shaft*) ir jo dalys[23]. Priekinėje dalyje išdėstyti raktas ir išorinis sriegis skirtas centrinių velenų sujungti su priekiniu velenu. Aušinimo angos skirtos ne tik veleno galinės dalies aušinimui tačiau ir sudaryti oro tarpą skirtą sandarinimui tarp atskirų turbinos dalių.

Turbinos rotorius yra vienas iš svarbiausių variklio atsakingųjų komponentų. Dideli rotoriaus krūviai būna ne tik dėl greito jo sukimosi, bet ir dėl darbo, esant labai aukštomis temperatūroms. Prie svarbių turbinos tobulinimo kryptių reikėtų priskirti medžiagų mechaninio atsparumo ir jų atsparumo aukštomis temperatūroms didinimą bei aušinimo metodų tobulinimą[2]. Kai medžiagos naudojamos esant aukščiausiam leidžiamų įtempių laipsniui, kritiniai variklio parametrai, tokie kaip, į turbiną įeinančių dujų temperatūra ir rotoriaus apsisukimų skaičius – turi būti atidžiai reguliuojami. Kadangi ir tame pačiame konstrukcine mazge yra šešto numerio guolis, galima to paties principo temperatūros įtaka guolio tvirtinimo veržlei ir jos patiriamiems krūviams.

Toliau darbe pateikta „CF6-80E“ variklio žemo slėgio turbinos konstrukcinė analizė. Žemo slėgio turbina LPT yra viena iš žemo slėgio sistemos dalių. Turbinos konstrukciją sudaro turbinos korpusas, rotorius, galinis turbinos rėmas. Aplink turbinos korpusą išdėstyti aušinimo elementais kuriais paduodamas oras skirtas aušinti turbinos korpusą. Suspaustas oras skirtas aušinimui paduodamas iš busterio (žemo slėgio kompresoriaus). Priekinėje turbinos dalyje aplink korpusą išdėstyti įeinančių dujų temperatūros jutikliai. Apatinėje dalyje kraštuose yra įeinančios ir išeinančios alyvos vamzdeliai skirti paduoti alyvą į galinį D karterį skirta žemo slėgio veleno 6R guolio tepimui.



**1.8 pav.** Žemo slėgio turbinos modulis ir veleno mazgo padėtis. Tiriama mazgo padėtis centrinėje turbinos ertmėje. Priekinė jungiamoji plokštuma skirta sujungti žemo slėgio turbiną su aukšto slėgio turbina. Turbinos kartu sujungiamos kaištiniais varžtais ir veržlėmis[23].

Žemo slėgio turbinos rotorius sudarytas iš turbinos veleno, rotoriaus diskų, rotoriaus mentelių ir jungiančiojo varžto. Kūginis turbinos velenas, reikalingas perduoti mechaninį turbinos veleno

galingumą kompresoriui esančiam priekinėje variklio dalyje. Turbinos velenas turi specialų sujungiamąjį mazgą su N1 veleno skirtu sukuti ventiliatorių ir kompresorių. Specialus varžtas kartu sujungia abu šiuos konstrukcinius mazgus.

„CF6-80E“ variklių žemo slėgio turbinos sudarytos iš penkių turbinos diskų. Visi turbinos diskai tarpusavyje yra sujungti varžtais per specialias jungtis, kurios reikalingas N1 veleno galingumui perduoti. Žemo slėgio turbinos diskų forma yra kūginė, ji pamažu plonėja nuo apačios į viršų, kad būtų galima akumuliuoti išcentrines jėgas, atsirandančias besisukant diskui dideliu greičiu[2].

Standartinis turbinos disko išorinis kraštas skirtas mentelėms tvirtinti. Mentelės jungčių pagalba ir tam skirtais užraktais yra suprojektuotos taip kad panaikintų atsirandančias vibracijas. Nors ir nedidelės vibracijos, tačiau jos gali turėti labai daug įtakos galinio turbinos guolio konstrukcijos mazgui. Taip pat sudėtinga aušinimo sistema padeda aušinti ir reguliuoti temperatūrą tarp diskų kuri glaudžiai susijusi su veleno guolio tvirtinimo mazgo gale temperatūra.

Turbinos mentelės aušinamos oro tiekiamu iš kompresoriaus. Tiekti aušinimo orą rotoriaus mentelėms reikalingos sudėtingos konstrukcinės sistemos. „GE C6-80“ modelio varikliuose aušinimo oras teka kūginiu, išoriniu turbinos veleno paviršiumi, kad aušintų rotorius ir turbinos diskus iš vidaus. Problema, susijusi su variklio dalių aukštos temperatūros aušinimu, sudaro dujose esančios mažos dalelytės. Jeigu jos užkemša aušinimo oro kanalus ar išėjimo plyšius, vietinis perkaitimas per keletą sekundžių gali katastrofiškai sugadinti turbiną ir jos konstrukcinius mazgus[2].

### **Veleno guolių tepimo sistemos**

„CF6-80E“ variklių guoliai nuolatos turi būti tepami. Ankstesnėje dalyje buvo pažymėti kokie guoliai priklauso kuriam velenui. Tiek aukšto slėgio, tiek ir žemo slėgio sistemas sudaro ritiniai ir rutuliniai guoliai. Ritiniai guoliai gali turėti tik radialines apkrovas, tai yra slydimo guoliai, rutuliniai – išilgines ir radialines apkrovas, traukos guoliai. Variklio eksploatacijos metu kada guolis būna apkrautas, padidėja jo temperatūra ir atsiranda tikimybė, kad gali atplyšti labai smulkios, mikroskopinės metalo dalelytės, atplaišos nuo kurios nors guolio dalies. Tai gali būti nuo paties guolio rutulio arba ritinio, gali ir nuo vidinio žiedo paviršiaus.



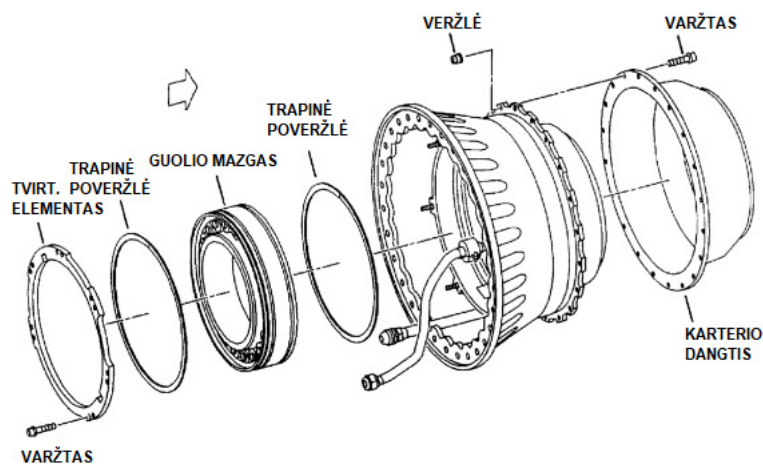
„CF6” reaktyvinio variklio modeliams alyva reikalinga sutepti ir aušinti guolius. Taip pat alyva atlieka ir smulkių guolio atplaišų, dalelių išplovimo funkcija. Visais atvejais šio modelio skirtingiems variklių tipams guolių tepimo sistema suprojektuota kaip uždara sistema.

Pagrindinės guolių tepimo sistemos posistemės:

- alyvos tiekimo į guolių karterius;
- paduodamos alyvos slėgio palaikymas;
- alyvos temperatūros stebėjimas;
- tepimo sistemos filtravimas;
- naudotos alyvos pašalinimo.

Alyvos tiekimo posistemę sudaro alyvos bakas, alyvos tiekimo vamzdynai, alyvos siurbliai (1.10 pav.), grįžtamosios alyvos linijos. Aukšto slėgio siurblys variklio alyva perduoda į filtrą, prieš ištekančią iš padavimo liniją iš siurblio mazgo. Alyva iš siurblio mazgo perduodama į tiekimo vamzdyną, per juos į guolių karterius, kurie yra velenų guolių ertmėse ir išpurškama dalyse kurias reikia sutepti (1.9 pav.).

Grįžtamosios alyvos tekėjimo sistemą sudaro alyvos siurbliai, grįžtamosios alyvos filtrai ir magnetiniai detektoriai, kuro ir alyvos šildymo keitiklis ir paties vamzdino. Alyva iš skirtingų guolių karterių, taip ir priedų pavaros dėžės elementų teka per siurblių į specialų atplaišų, metalinių dalelių detektorius, vėliau per grįžtamosios alyvos filtrą, iš ten į kuro ir alyvos šildytuvą ir galiausiai sugrįžta į alyvos baką.

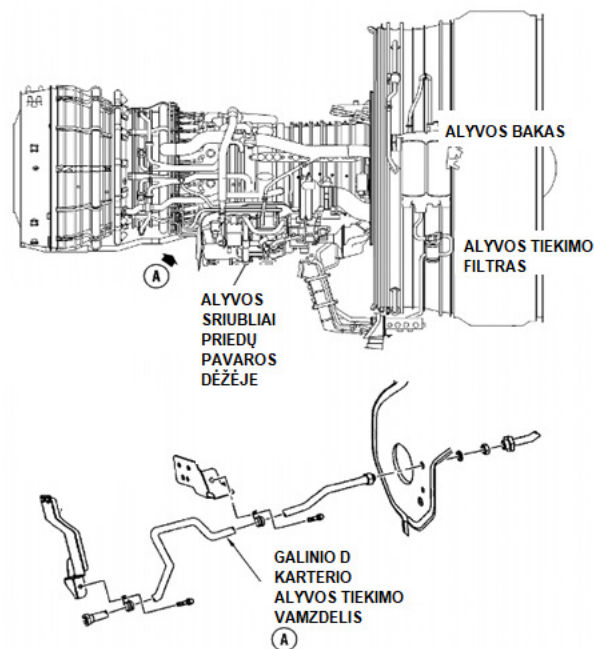


**1.9 pav.** Galinis 6R guolio karterio mazgas ir guolio dalies kurioje išdėstyti ritiniai surinkimo schema.

Brėžinyje matyti vamzdeliai skirti paduoti ir paimti alyva iš karterio[26].

Alyvos bakas sumontuotas ant variklio dešinės pusės (1.10 pav.), jungtėmis slopinančiomis patiriamas vibracijos. Alyvos baką, kaip vientisą mazgą galima paprastai nuimti, jei to reikalauja transportavimas arba bako išvalymui, išrinkimui. Iš bako viršaus įmontuotas alyvos kiekio daviklis. Pats bakas padengtas silikono sluoksniu apsaugančiu nuo galimo užsidegimo.

Keičiant alyvos filtrus, specialūs tam skirti apsauginiai vožtuvai neleidžia nutekėti alyvai ir lengvai ne nuostolių juos pakeisti.



**1.10 pav.** Alyvos bako, padavimo filtro ir siurblių padėtis „CF6-80E” variklyje[26].

### ALYVOS SANDARINIMO VELENO MAZGE SUKŪRIMAS.

Svarbu pastebėti, kaip alyva sandarinama tarp karterių ir veleno ertmių. Iš ventiliatoriaus arba kompresoriaus suslėgtas oras naudojamas apsaugoti, kad alyva neištekėtų per sandarinimo elementus ir aušintų guolių ertmes. Vidiniai guolių paėmimai suprojektuoti taip, kad oro srovė per sandarinimus priešintųsi alyvai ištekėti[2]. Siūlo pavidalo grioveliai ant veleno apsaugo, kad alyva neištekėtų per sandarinimo įtaisą tuo laiku, aki variklis pradeda dirbti ir yra paleidžiamas iki to laiko, kol iš kompresoriaus į sandarinimo įrenginį ateina suslėgtas oras.

### KONSTRUKCINIO MAZGO ALYVA

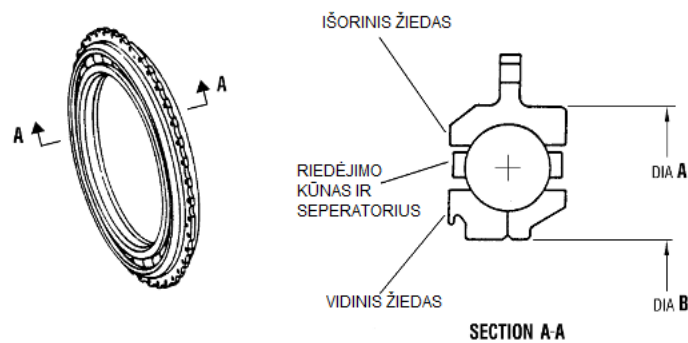
Nuolatinis krūvių ir darbo guolių temperatūrų didėjimas šiuose varikliuose verčia tobulinti sintetinę alyva. Didžiausias šios alyvos privalumas yra tai, kad maždaug pastovus yra alyvos klampumas net iki minus 40 °C temperatūros, ir taip išlaikomos tepimo savybės.

## Variklio guoliai ir velenų tvirtinimo konstrukcijos

Žemo slėgio sistemos pagrindiniai konstrukciniai mazgai: priekinis ir galinis tvirtinimo mazgas. Priekinis tvirtinimo mazgas apibrėžtas ventiliatoriaus ir busterio konstrukciniu sujungimu. Galinis veleno mazgas konstrukcijos sudėtingumu nenusileidžia priekiniam mazgui, tačiau dirbant su „CF6-80E1” varikliu pastebėta, kad reikalingas patobulinimas konstrukciniu atžvilgiu dėl atsirandančios guolio problemos.

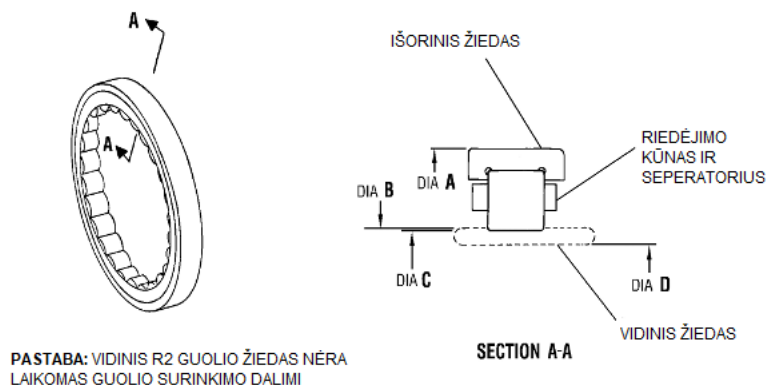
Žemo slėgio sistemos N1 velenas variklyje sukasi guoliuose 1B, 2R ir 6R.

### PRIEKINIS VELENO TVIRTINIMO MAZGAS



**1.11 pav.** Traukos guolis 1B. Pagrindinės guolio dalys ir matmenys reikalingi patikrai atlikti.

DIA A	18.8097 in (477.766 mm) – 18.8111 in (477.802 mm)
DIA B	13.5996 in (345.430 mm) – 13.6007 in (345.458 mm)



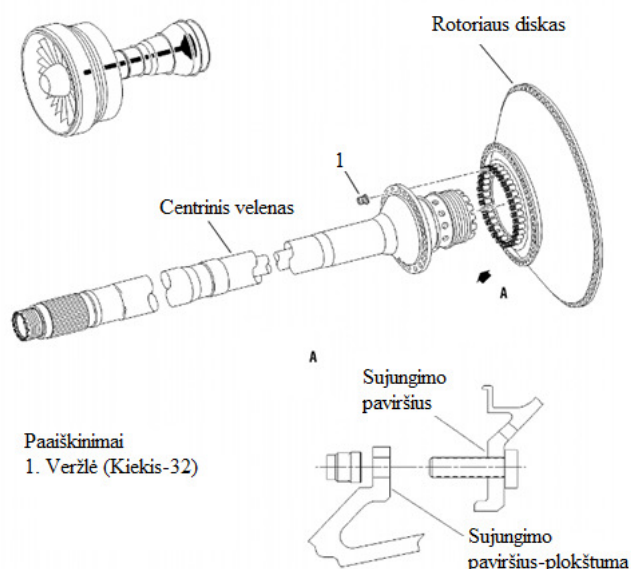
**1.12 pav.** Ritininis guolis 2R. Pagrindinės dalys ir matmenys reikalingi patikrai atlikti.

## Guolis Nr.2

DIA A	8.8885 in (225.768 mm) – 8.8893 in (225.788 mm)
DIA B	7.1030 in (180.416 mm) – 7.1040 in (180.442 mm)
DIA C	7.0962 in (180.244 mm) – 7.0970 in (180.264 mm)
DIA D	6.6195 in (168.135 mm) – 6.6203 in (168.156 mm)

## GALINIS VELENO TVIRTINIMO MAZGAS

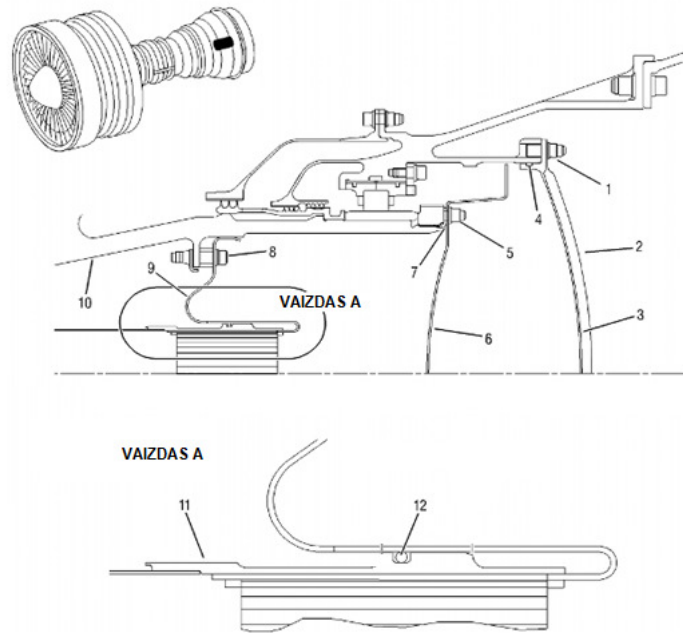
Galinio tvirtinimo mazgą galima išskaidyti į du labai svarbius konstrukcinius mazgus: veleno sujungimo su žemo slėgio turbinos rotoriumi mazgą ir galinio guolio bei karterio mazgą. Veleno su turbinos rotoriumi sujungiamasis mazgas aprašytas ankstesniame skyriuje, todėl žemiau pateiktas mazgo konstrukcinis atvaizdavimas(1.13 pav.).



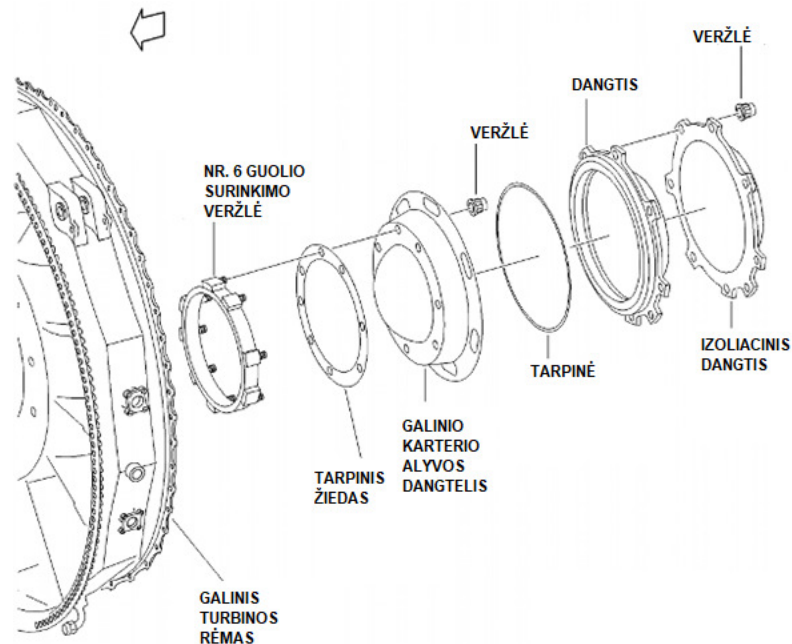
**1.13 pav.** Centrinio veleno (*midshaft*) ir žemo slėgio turbinos LPT rotoriaus sujungiamasis mazgas ir konstrukcijos padėtis variklyje.

Antras konstrukcinis mazgas – 6R guolio, galinio D karterio konstrukcija ir jos elementai(1.14 pav.). Šis veleno konstrukcinis mazgas turi tiesioginę įtaką visoms žemo slėgio turbinos pakopoms, įtraukiant tiek turbinos diskus tiek turbinos pakopų menteles. Atsižvelgiant į problemos aktualumą svarbu pastebėti, kad guolio padėties pakitimas ar bendras mazgo pakitimas savo parametrais turi įtaka atstumui tarp turbinos mentelių kurios yra išdėstytos rotoriuje ir statoriaus sienelių.

Toliau pateikti tiriamojo veleno mazgo išsamios konstrukcinės schemos.



**1.14 pav.** „CF6-80E” variklio 6R guolio ir galinio karterio konstrukciniai elementai ir surinkimo schema. Paaškinimai: 1- Tvirtinančioji veržlė, 2 – izoliacinis dangalas, 3 – 6R guolio ir galinio D karterio išorinis dangtis, 4 – dangčio tarpinė, 5 – tvirtinančioji veržlė, 6 – guolio ir galinio karterio alyvos dangtis (paskirstymo), 7 - 6R guolio vidinis tarpinis žiedas, 8 – varžtas, 9 - atrama, 10 – centrinis velenas, 11 – centrinis ventiliacinis vamzdis, 12 – tarpinė.



**1.15 pav.** Guolio užtvirtinimo konstrukcinio mazgo elementų išdėstymas nuo guolio veržlės iki izoliacinio dangčio. Tarpinis žiedas, tai žiedas su užraktu (dviem skirtingose padėtyse išdėstytais kaiščiais) 6R guolio veržlei.

## 1.6 Variklio veleno mazgo problema

Vieni pagrindiniu reikalavimų keliami reaktyviniams varikliams – patikimumas, ilgaamžiškumas ir efektyvumas. Šiame darbe daugiausia dėmesio skiriama variklių patikimumui ir ilgaamžiškumui. Nors ir kaip būtų svarbus šiuolaikinių variklių efektyvumas, kuro suvartojimas, skleidžiamo triukšmo mažinimas, tačiau pirmoje vietoje visada išlieka variklio patikimumas, lemiantis skrydžių saugą. Tiek patikimumas, tiek ilgaamžiškumas yra glaudžiai tarpusavyje susiję. Jei kuris nors konstrukcinis mazgas ne dirbs taip kaip priklauso, atsiradęs gedimas arba pašalinis trukdis jame, gali pažeisti kitus konstrukcinius elementus arba sunkiai sutrikdyti variklio darbą, ne tik lemiant įtaką variklio eksploatacijai skrydžio metu, tačiau ir didelį pavojų žmonėms.

Remiantis atlikta reaktyvinių variklių konstrukcine ir eksploatacine analize pasirinkta aktuali „General Electric“ „CF6-80E“ variklio centrinio veleno guolio tvirtinimo mazgo problema. Ši problema paremta „CF6-80E“ varikliuose atsiradusiais guolio, guolio tvirtinimo veržlės ir tarpinio žiedo su veržlės užraktu pažeidimais. Variklį sudaro šeši guoliai. 1B, 2R ir 6R guoliai išdėstyti žemo slėgio sistemoje ir juose sukasi N1 velenas. Svarbu paminėti, kad velenas suka tarpusavyje ventiliatorių, busterį ir žemo slėgio turbiną. Kurio nors guolio kritinis gedimas turi didžiausią įtaką variklio pažeidimui ir skaudžioms pasekmėms.

Pagrindiniai projekto techninės ir eksploatacinės analizės uždaviniai:

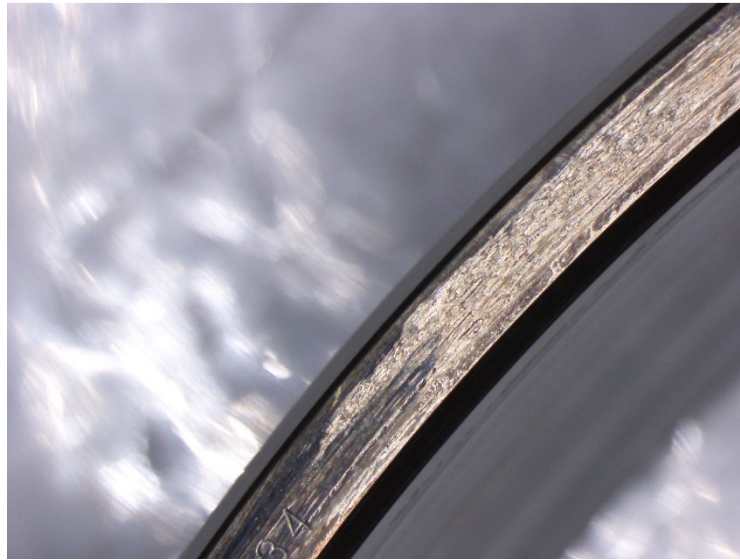
- nustatyti veleno mazgo leistinas ribas;
- nustatyti guolio tvirtinimo problemą ir pateikti atsiradimo požymius;
- pagrįsti problemos veleno tvirtinimo mazge aktualumą ir svarbą;
- iškelti projektinės darbo dalies tikslus.

Problema. Galiniame N1 veleno 6R guolio tvirtinimo mazge po 4700 skrydžio valandų aptinkama, kad guolio tvirtinimo veržlė yra galimai atsisukusi. Aptinkami guolio ir galinio karterio elementų pažeidimai.

Pažeidimai ir pasekmės. Pirmiausiai atsisukus slydimo guolį tvirtinančiai veržlei, pažeidžiama galinio karterio konstrukcija, jos elementai. Jei problema neaptinkama anksčiau, stipriau pažeisti karterio elementai, gali įtakoti guolio nepakankamą tepimą, perkaitimą, vibracijas. Toliau galimi tik kritiniai scenarijai, kaip veleno vibracijos, užsikirtęs galinis guolis ir net sutrikdytas turbinos darbas.

Guolio tvirtinimo mazgo problemos požymiai:

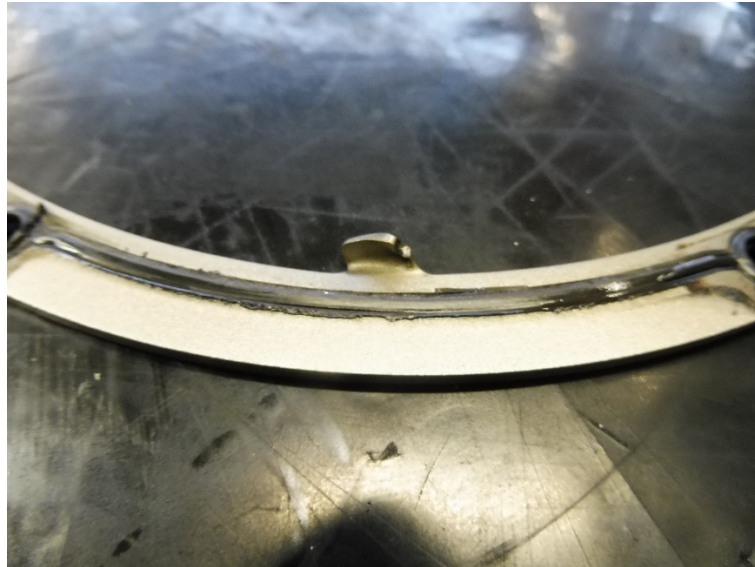
- techninės priežiūros metu alyvos filtruose aptinkamos smulkios metalinės dalelės iš galinio variklio guolio karterio (variklis turi ne vieną alyvos filtrą, pagal tai kuriame yra aptinkamos dalelės, nuolaužos, atlaužos galima tiksliai nustatyti iš kurios variklio sistemos jos yra);
- išardžius galinį mazgą techninės patikros metu ant 6R guolio žiedo briaunos paviršiaus (tarp guolio ir tvirtinimo veržlės) aptinkamos prasisukimo (praslydimo) žymės (1.16 pav.);
- išardžius galinį mazgą techninės patikros metu 6R guolio veržlės tarpinis žiedas su užraktu aptinkamas stipriai pažeistas. Užraktas turi du kaiščius, kurie būna pažeisti (užlenkti suglemžti). Pažeidimai pateikti pavyzdyje (1.17 pav. ir 1.18 pav.).



**1.16 pav.** „CF6-80E1“ variklio 6R guolio žiedo briaunos pažeidimas. Techninės priežiūros metu išėmus guolį iš galinio karterio patikros metu aptiktos prasisukimo, slydimo žymės ant guolio briaunos žiūrint iš variklio galo (tarp guolio ir tvirtinimo veržlės).



**1.17 pav.** Pavyzdys-1. Pažeistas guolio veržlės tarpinis žiedas su užraktu.



**1.18 pav.** Pavyzdys-2. Pažeistas guolio veržlės tarpinis žiedas su užraktu. Nuotraukose matomi pažeisti užrakto kaiščiai (užlenkti).

Atsiradimo priežastys:

- variklių paleidimo metu naudojamos skirtingos paleidimo procedūros, kurios gali turėti įtakos velenui ir jo deformacijoms;
- pakilimo metu naudojama netinkama arba neleistina variklio trauka, kintama netolygiai, taip turint įtakos veleno galimoms deformacijoms;
- veleno 6R guolio tvirtinimo veržlė užsukama per mažu jėgos momentu;
- atsiradusios per didelės ir neleistinos vibracijos;
- aukštos darbo temperatūros įtaka arba temperatūros pokyčiai;

Tikslai ir uždaviniai sprendžiant veleno mazgo problemą:

Atlikti veleno mazgo inžinerinį tyrimą ir pateikti galimus problemos sprendimo būdus. Šiam tikslui pasiekti turi būti išspręsti išsikelti uždaviniai.

Darbo uždaviniai:

- Atlikti eksperimentinį veleno tyrimą;
- Nustatyti veleno mazgo konstrukcinių elementų parametrus;
- Pateikti veleno tvirtinimo mazgo konstrukcijos tobulinimo kryptis;
- Nustatyti ir parinkti variklio mazgo elementų gamybos medžiagas;
- Atlikti veleno galinio mazgo modeliavimą;
- Nustatyti variklio darbo temperatūras kilimo metu;
- Nustatyti optimalius variklio darbo ciklus.



## **2 REAKTYVINIO VARIKLIO VELENO MAZGO PARAMETRAI IR TOBULINIMO KRYPTYS**

Projektinėje dalyje atliktas eksperimentinis veleno tyrimas. Atsižvelgiant į gautus rezultatus ir pastebėjimus nustatyti galinio karterio mazgo konstrukcinių elementų charakteristikos ir parametrai. Pateikiamos veleno tvirtinimo mazgo konstrukcijos tobulinimo kryptys. Remiantis konstrukcijos tobulinimo aspektais nustatytos variklio tiriamojo mazgo gamybos medžiagos. Dėl sutinkamos problemos iš pagrindų keičiama mazgo konstrukcija ir atliktas mazgo modeliavimas. Modeliavimo metu nustatyta elementų, iš jų tarpinio sandarinimo ir užrakinimo žiedo papildomų kaiščių padėtis bei atlikti mazgo konstrukcijos stipruminiai skaičiavimai „SOLIDWORKS“ programine įranga.

### **2.1 Eksperimentinis veleno tyrimas**

#### **Praktinė projekto tyrimo dalis**

Projekto metu siekiant išsiaiškinti problemą ir surasti sprendimo būdams buvo atlikti praktiniai darbai su „CF6“ varikliais ir susipažinta su konstrukcijomis bei anksčiau eksploatacinėje analizėje išnagrinėtais variklių mazgais išsamiau.

Projekto metu eksperimentiniam tyrimui atlikti darbai:

- variklio patikra prieš išardymą ir modulių atskyrimą;
- variklio modulių atskyrimas;
- veleno išėmimas;
- veleno balansavimo procedūra;
- eksperimentinis veleno mazgo tyrimas balansavimo stende;
- guolio konstrukcinio mazgo elementų įvertinimas ir patikra.

Pirmas etapas yra variklio patikra prieš išardymą ir modulių atskyrimą. Kaip ir šio tyrimo metu taip ir kitų reaktyvinių variklių kurie atvyksta į dirbtuves techniniam aptarnavimui prieš išardymą jiems atliekama pirminė patikra. Nors ir žinoma pagrindinė priežastis arba gedimas dėl kurio variklis atvyko remontui, atlikto projekto atveju priežastis galinis veleno mazgas, tačiau pagal keliamus reikalavimus ir procedūras atliekami pirminės apžiūros darbai siekiant nustatyti variklio būklę ir aptikti visus galimus gedimus ir vietas reikalaujančias remonto. Atliekami darbai, kaip kuro, alyvos filtrų patikra, ventiliatoriaus metelių, variklio komponentų patikros, slėgio ir pralaidumo bandymai, alyvos karterių ir riebokšlių patikrinimas. Tikrinamos ir variklio uždegimo žvakės, ir atliekami neardomosios kontrolės bandymai dalims kuriose galimi įtrūkimai(galinis žemo slėgio turbinos korpuso rėmas).

Sekanti dalis, po pirminės patikros ir darbo užduočių parengimo, yra variklio modulių atskyrimas ir paruošimas remontui. Variklio moduliai turi būti atskirti vienas nuo kito, kad būtų galima pasiekti konstrukcinius mazgus ir variklio vidines sistemas. Bendras variklio ardymas pradedamas pagrindinių variklio dalių nuardymu. Numontuojamos visos QEC dalys ir LRU komponentai. Taip paruošiamas variklis išskaidymui į atskirus modulius.

Paaiškinimai:

QEC – angl. Quick Engine Change. Variklį supantys vamzdynai, kronšteinai, laikikliai, aušinimo kolektoriai, traukės.

LRU – angl. Line Replacement Unit. Variklio komponentai. Vožtuvai, hidrauliniai cilindrai, variklio tvirtinimo mazgai.

Be QEC ir LRU komponentų variklis dalinai lieka sudarytas tik iš greta vienas su kitu sujungtų modulių.

## MODULIŲ ATSKYRIMO PROCEDŪROS

„CF6-80E“ variklio centrinis velenas MIDSRAF išmontuojant iš variklio lieka kartu sujungtas su LPT.

Veiksmai atlikti išmontuojant centrinį veleną:

- išardomas galinis karterio mazgas ir atsukama 6R guolio veržlė;
- iš variklio galo prie galinio LPT korpuso pritvirtinama veleną laikančioji konstrukcija ir kartu sujungiama su veleno, kad atjungimo metu būtų nuimtos apkrovos nuo rotorius ir nebūtų pažeisti pagrindiniai turbinos mazgai;
- prie galinio turbinos korpuso tvirtinama visą turbinos ir veleno mazgą (modulį) laikančioji konstrukcija, kuri sujungiama su keltuvu prie variklio stendo;
- priekinėje variklio dalyje (busterio vidinėje dalyje) atjungiamas velenas nuo ŽS kompresoriaus, atsukta vidinė ir išorinė veržlė;
- pašalinus visus tvirtinančius varžtus su veržlėmis iš jungiančiosios plokštumos tarp LPT ir HPT, priekinėje dalyje prie ventiliatoriaus pagrindinio disko pritvirtinama konstrukcija su hidrauliniu presu kurio pagalba velenas su žemo slėgio turbina atjungiamas nuo likusios variklio dalies (žr. 2.1 pav.)
- atskiriami moduliai vienas nuo kito, turbina su centriniu veleno nuleidžiama ant specialaus transportavimo stendo.



**2.1 pav.** Pritvirtinto hidraulinio preso prie žemo slėgio kompresoriaus pagrindinio disko skirtos turbinos ir veleno atjungimui praktinis pavyzdys.

Atjungtam velenui nuo turbinos rotoriaus buvo atliktas balansavimas.

Balansavimas atliktas „HOFMANN GE“ bandymų stende. Velenas balansavimas atliktas 700-1300 min/aps. intervale. Balansavimas laikomas atliktu kada pasiekiamas 20 g per 1 in veleno tikslumas. Balansavimo metu buvo atlikti bandymai su užsukta 6R guolio veržle. Pirmas bandymas veleną įsukant tolygiai keliant apsisukimus iki 1300 aps/min. Antras bandymas veleną įsukant didinant apsisukimus labai greitai iki didžiausių leistinų stende – 1300 aps/min. Pastebėta, kad atlikus antrą bandymą veržlė buvo atsileidusi. Bandymų metu veržlė buvo užsukama jėgos momentu nuo 200 Nm iki 400-407 Nm.

1 bandymas – pasiekti 1300 aps/min [6-8] sek. intervale (laikini balansavimo duom. 20-23g);

2 bandymas – pasiekti 1300 aps/min [2-3] sek. intervale (laikini balansavimo duom. 34-40g);

**2.1 lentelė.** Veleno bandymo rezultatai:

Jėgos momentas\bandymas	1 bandymas	2 bandymas
Iki 200 Nm	Neatsisukusi	Atsisukusi
400-407 Nm	Neatsisukusi	Atsisukusi

Bandymo metu pastebėta, kad didinant apsisukimus labai staiga ir atsiradus papildomoms vibracijoms, prasideda veržlės atsisukimo procesas. Būtina pažymėti bandymo metu veržlė nefiksuota.

## 2.2 Veleno guolio mazgo parametrų nustatymas

### Veržlės atsisukimo procesai.

Pagrindinės veržlės atsisukimo priežastys gali būti: temperatūra, užsukimo momentas, vibracijos.

Labai didelę įtaką gali padaryti keičiantis temperatūrai. Svarbu pažymėti, kad tiriamas mazgas eksploatuojamas esant itin aukštai temperatūrai. Kartais temperatūra gali būti didesnė nei leistina, arba būti pakilti labai staiga.

Labai nedidelė riba tarp tinkamo veržlės užsukimo momento ir per didelio, kitaip „perveržimo“, kuris gali lemti veržlės atsisukimą variklio darbo metu. Tačiau tokia pati galimybė atsisukti yra kai jėgos momentas yra per mažas.

Kai kuriais atvejais veržlė gali atsisukti, dėl sąlygų kuriomis tas mazgas yra eksploatuojamas. Vienas iš šių sąlygų yra vibracijos. Jei darbo aplinkoje, šiuo atžvilgiu veleno mazge, yra per didelės vibracijos, jos gali sukelti vertikalų sriegių judėjimą, tarp veržlės ir veleno, ir todėl veržlė gali atsilaisvinti. Kai jungtyje atsiranda poslinkis, savaiminis užsukimas gali būti pakeistas savaiminiu atsisukimu ir taip gali prasidėti savaiminis atsisukimo procesas.

$$a = \frac{F_V \cdot \mu \cdot l_k^3}{12 \cdot EI} \quad (2.1)$$

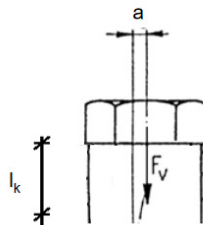
čia:

$F_V$  – varžto apkrova

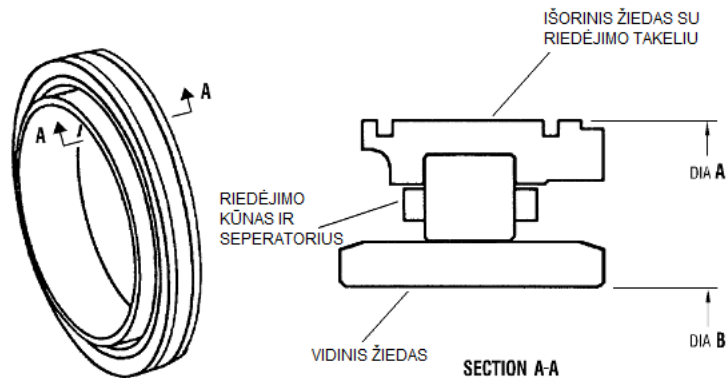
$\mu$  – trinties koeficientas tarp veržlės ir paviršiaus

$l_k$  – sujungimo atstumas (apkraunamos dalies atstumas)

$EI$  - standumas



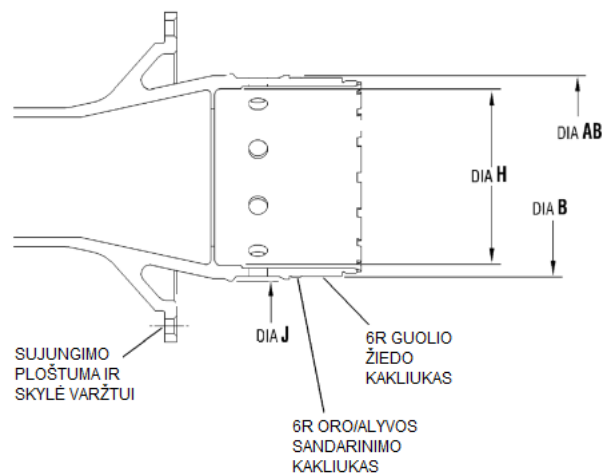
2.2 pav. Veržlės poslinkis. [13]



**2.3 pav.** Ritininis guolis 6R. Pagrindinės dalys ir matmenys reikalingi patikrai atlikti

Guolis Nr.6

DIA A	10.2654 in (260.741 mm) – 10.2668 in (260.777 mm)
DIA B	8.2601 in ( 209.807 mm) – 8.2609 in (209.827 mm)



**2.4 pav.** N1 veleno galinės dalies matmenys patikrai atlikti

N1 veleno ties guolio 6R pozicija duomenys

DIA J	8.6180 in (218.897 mm) – 8.6190 in (218.923 mm)
DIA AB	8.2810 in (210.337 mm) – 8.2815 (210.350 mm)
DIA H	7.340 in (186.44 mm) – 7.351 in (186.71 mm)
DIA B	8.2628 in (209.875 mm) – 8.2632 in (209.885 mm)

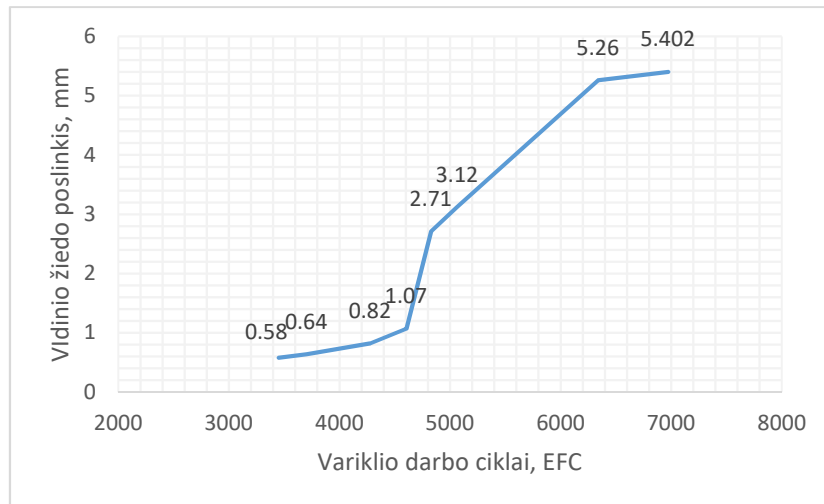
Svarbu pastebėti, galinės veleno dalies guolio montavimo vietos pakitimus.

Remiantis **J, AB, H, B** matmenimis įvertinama galima guolio pasislinkimo įtaka centrinio veleno pažeidimams.

Dėl pasitaikančios problemos su galiniu 6R guolio mazgu, pažeidimai aptinkami ant guolio vidinės(žiedo) dalies. Taip pat sutinkami atvejai kada guolio žiedas pasislenka iš savo vietos.

**Didžiausias praktikoje nustatytas pasislinkimas vidinio žiedo skrydžio kryptimi(iš priekio atgal) – 5.402 mm.**

Tyrimo metu surinkti ir nustatyti tiek žiedo poslinkiai prasidėjus atsisukimo procesams ant veleno tiek ir paties guolio leistini matmenys ašies atžvilgiu.



**2.5 pav.** nustatyti guolio vidinio žiedo poslinkiai.

Remiantis duomenimis ir (2.5 pav.) grafiku pastebima staigus poslinkių išaugimas nuo 4600 skrydžių ciklų skaičiaus. Todėl labai svarbu nustatyti ir sumažinti esamą (4700 EFC) ciklų skaičių iki tiriamo mazgo patikros. 2.2 lentelėje pateikti „CF6-80E“ ašiniai guolio poslinkiai.

**2.2 lentelė.** Tyrimo metu surinkti guolio patikros duomenys.

Variklis	Guolio vidinio žiedo, mm
1	260.744
2	260.745
3	260.742
4	260.743
5	260.738
6	260.727
7	260.723
8	260.711

Iš surinktų duomenų nustatyti keturi guolio išsidėvėjimo kartai kada atstumas iki vidinio žiedo nepasiekia minimalios 260.741 mm ribos. Todėl guolio mazgo jungtyje atsiranda poslinkiai, kurie pradeda savaiminio atsisukimo procesą.

## 2.3 Variklio mazgo gamybos medžiagos

Konstruktinių elementų medžiagos parinkimas ir cheminių elementų sudėties pasiskirstymo tyrimas yra labai svarbus projekto etapas. Tiek esamų tiek ir naujų projektuojamų variklių įvairūs konstrukciniai mazgai kurie pagaminti iš atitinkamų medžiagų, privalo atlaikyti deformacijas ir dirbti esant itin aukštomis temperatūroms. Vienas iš projektų tikslų nustatyti tiriamo konstrukcinio mazgo elementų medžiagų mechanines savybes. Ar konstrukcinis mazgas (mazgo elementas) yra pakankamai stiprus, standus, stabilus galima nustatyti pagal medžiagos mechanines savybes.

Medžiagos yra įvairūs cheminių elementų deriniai. Pagrindinis šio skyriaus uždavinys pateikti esamų medžiagų standartus, mechanines savybes, chemines sudėtis ir parinkti naujas, atsižvelgiant į tiriamąjį darbą. Tinkamas medžiagos pasirinkimas užtikrina ne tik atskiro elemento, bet ir viso konstrukcinio mazgo patikimumą ir ilgaamžiškumą.

Turbinos rotoriaus mazgas yra viena iš svarbiausių atsakingųjų variklio sistemų. Dideli rotoriaus krūviai būna ne tik dėl greito jo sukimosi ir tenkančių vibracijų, tačiau ir dėl darbo, esant labai aukštomis temperatūroms. Prie variklio turbinos rotoriaus sistemos kaip atskira dalis yra priskirtas nr.6 guolio mazgas. Todėl prie svarbių turbinos tobulinimo kryptių reikia priskirti medžiagų mechaninio atsparumo, ir žinoma, atsparumo aukštomis temperatūroms didinimą ir aušinimo sistemų tobulinimą. Kada medžiagos naudojamos aukščiausių įtempių laipsniui, kritiniai variklio parametrai turi būti tiksliai reguliuojami. Priešingai, esant nedideliam netikslumui, galimi gedimai turbinos mazguose. Šiuo atveju, tai nr.6 guolio veržlės problema. Šioje dalyje atliktas medžiagų nustatymas ir parinkimas nr.6 guolio mazgui padidinant atsparumą darbui prie itin aukštų temperatūrų. Tai gali būti vienas iš guolio tvirtinimo problemos sprendimo atvejų analizuojant guolio veržlės atsisukimo procesus.

### GUOLIO TVIRTINIMO ELEMENTŲ MEDŽIAGOS.

#### **Žiedą prispaudžiantis ir galinį guolio karterį uždengiantis dangtelis(angl. beaing oil slinger)**

Medžiaga: AMS 5510 321

Cheminė sudėtis (žr. 2.3 lentelė.)

**2.3 lentelė.** Cheminė medžiagos AMS 5510 321 elementų pasiskirstymas.[25]

Elementas, %	C	Si	Mn	P+S	Cr	Ni	Ti	N	Fe	Mo
<b>AMS 5510</b>	0.08	0.25-1.00	2.0 maks.	0.04 P 0.03 S	17-19	9-12	0.7 maks.	0.1 maks.	Bal	0.75

Medžiagos mechaninės savybės.

Tankis	7.92 g/cm <sup>3</sup>
Tamprumo modulis	193 GPa
Lydimosi temperatūra	1398-1446 °C
Tiesinio plėtimosi koeficientas	20-100 °C 16.6 · 10 <sup>-6</sup> 1/°C
	20-600 °C 18.9 · 10 <sup>-6</sup> 1/°C
	20-1000 °C 20.5 · 10 <sup>-6</sup> 1/°C
Takumo riba tempiant	205 MPa
Stiprumo jėga tempiant	515 MPa

**Tarpinis žiedas su užraktu (angl. Integral ring) ir Nr.6 guolį tvirtinanti veržlė (angl. No. 6 plain-nut)**

Medžiaga: 17-4P A286

Medžiaga skirta naudoti aplinkoje kurioje temperatūra iki 1300°F (704°C). Pasižymi dideliu stiprumu tempiant, atsparumu korozijai.

Guolio veržlė papildomai padengta Moly-Dag 254 medžiaga siekiant padidinti pasipriešinimą korozijai.

**2.4 lentelė.** 17-4P A286 medžiagos cheminė sudėtis.[25]

%	Cr	Ni	Cu	C	Mn	P	S	Si	Nb-Ta	Fe
<b>17-4P A286</b>	15.0 – 17.5	3.0 – 5.0	3.0 – 5.0	0.07	1.0	0.04	0.03	1.0	0.15 – 0.45	Bal

### **17-4P 286**

Tankis	7.75 g/cm <sup>3</sup>
Lydimosi temperatūra	1400-1440 °C
Tamprumo modulis	196 GPa
Specifinė šiluma	460 J/kg-°C 20°C

Nr.6 guolio mazgas išdėstytas galinėje žmeo slėgio turbinos dalyje. Vidutinė darbo temperatūra nustatytoje vietoje siekia 1100 °C. Tačiau prieš turbiną temperatūra didinama iki 1300°C. Temperatūra prieš turbiną didinama ir keliami kas kartą projektuojant naują variklį dėl pagrindinių keliamų reikalavimų: didelė trauka esant mažam variklio svoriui (didelis traukos ir svorio santykis), nedidelis kuro suvartojimas.



Itin aukšta temperatūra skirtingai veikia tubinų mazgus ir elementus. Didžiausias terminis krūvis tenka aukšto slėgio turbinai ir jos mazgam, tačiau terminis nuovargis atsiranda ir žemo slėgio turbinoje. Terminis nuovargis tai procesas atsirandantis dėl temperatūrų ciklų kaitos, dėl kurios medžiagos pavargsta ir gali atsirasti įvairūs defektai ir iškilti problemos. Ši situacija priverčia kurti naujas arba tobulinti esamas medžiagas mazgų elementų, kad atlaikytų aukštas temperatūras.

Atliekant medžiagos pasirinkimą svarbu, kad pasirinkta medžiaga atitiktų keliamus reikalavimus. Elementas privalo atlaikyti didžiausius leistinus fizikinius apkrovimus. Taip pat turi būti įvertinta priešlaikinio gedimo, dėl terminio nuovargio, tikymybė.

### **Medžiagos pasirinkimas**

Įvertinus galinio guolio mazgo elementus pasirenkama keisti ir pasirinkti kitos sudėties nr.6 guolio mazgo elementų medžiagas siekiant padidinti atsparumą temperatūriniais poveikiams ir sumažinti galimybes atsirasti veržlės atsisukimo procesams.

Remiantis plieno rodikliais, stiprumo riba, proporcingumo riba, trapumas, tvermė, pasirenkama medžiaga pagrindiniams guolio mazgo elementams – veržlei ir tarpiniam žiedui.

Plieno mechaninės savybės ir cheminė sudėtis yra rodikliai, pagal kuriuos nustatoma plieno kokybė ir tai ar jis atitinka paskirtį, šiuo atžvilgiu žemo slėgio veleno mazgo elementas, kurių padėtis yra turbinoje. Plieno stiprumas nustatomas stiprumo riba  $\sigma_u$ . Stiprumo riba – įtempimas, kurį sukelia didžiausia atliekant bandymą pasiekiamą apkrova, tenkanti pradiniam bandinio skerpjūviui.

Proporcingumo riba  $\sigma_{pr}$  yra didžiausias įtempimas, iki kurio deformacijos kinta proporcingai įtempimams (Huko dėsnis). Su proporcingumo riba beveik sutampa tamprumo riba  $\sigma_e$ , t. y. toks didžiausias įtempimas, kuriam esant dar neatsiranda liekamųjų (plastinių) deformacijų. Proporcingumo riba ir tamprumo modulių apibūdinamas plieno tamprumas. Trapumas tai medžiagos savybė suirti, kai deformacijos mažos. Trapus suirimas yra pavojingas, nes konstrukciniuose elementuose kritiniai gedimai atsiranda staiga, be matomų deformacijų.[25]

Plieno trapumas didėja: mažėjant temperatūrai, esant įtempimų koncentracijai, veikiant daugkartinėms apkrovoms, pasireiškiant senėjimo reiškiniams. Plieno trapumui daro įtaką jo cheminė sudėtis ir gamybos technologija[27].

Svarbu rodiklis, glaudžiai siejamas su temperatūra yra tvermė. Tvermė – tai savybė išlaikyti formą ir kitas savybes nesuyrant, kai medžiagą ar lydinį veikia daug kartų besikeičiančios jėgos. Tvermės sumažėjimas vadinamas metalo nuovargiu. Tvermė priklauso nuo temperatūros pokyčių. Kaistančio metalo, projekto atveju, guolio veržlės turbinoje, tvirtumas, atsparumas mažėja, o plastiškumas didėja[25].

Pasirinkta medžiaga: 17-4 P 5643

Cheminių elementų sudėtis, %:

Ni	4.8
Cr	17.5
Cu	3.0-5.0
C	0.07
Si	1.0
Mo	0.5
Fe	Bal

Kiekybinis šiluminio plėtimosi rodiklis yra šiluminio plėtimosi koeficientas. Šiluminio plėtimosi koeficientas nurodo medžiagos ilgio, ploto, tūrio pokytį kintant temperatūrai. Šiluminio plėtimosi koeficientas lygus santykiniam kūno tūrio padidėjimui padidinus temperatūrą vienu kelvinu.[27]

**2.5 lentelė.** Medžiagų temperatūrinio plėtimosi koeficientai.[25]

<b>Medžiaga</b>	<b>Šiluminio plėtimosi koeficientai (<math>10^{-6} \text{ K}^{-1}</math>) 70-1000 F</b>
AMS 5510 (elemento)	20.2
17-4P A286 (elemento)	18.6
17-4P 5643(elemento)	21.0

## 2.4 Konstrukcinių tvirtinimo elementų charakteristikų nustatymas

Toliau darbe pateikti centrinio veleno konstrukcinio mazgo elementai ir jų charakteristikos. Apibrėžtos šio mazgo konstrukciniu atžvilgiu silpnos vietos ir kur iškyla problema. Kad būtų pateiktas problemos sprendimas ir sumodeliuotas patobulintas veleno konstrukcinis mazgas šioje projekto dalyje buvo nustatytos mazgo surinkimo charakteristikos: guolio tvirtinimo ir veržlės fiksavimo.

### Konstrukcinio mazgo elementai

Ekspluatacinėje analizėje buvo nurodyti „CF6-80E” variklio centrinio veleno tvirtinimo konstrukciniai elementai. Remiantis analize, antras pagal svarbą N1 veleno tvirtinimo mazgas (pirmas pagal svarbą yra priekinis tvirtinimo mazgas) yra Nr.6 guolio mazgas.

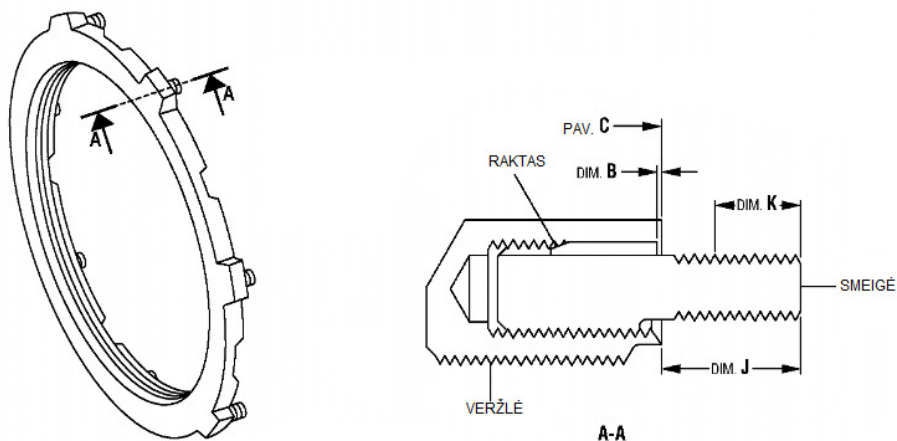
Pirmas priekinis tvirtinimo mazgas yra priekinis velenas su traukos guoliu skirtu priimti visas ventiliatoriaus apkrovas. Antras tvirtinimas, galinis mazgas su turninos rotoriaus jungtimi ir Nr.6 guoliu bei galiniu alyvos karteriu.

Nagrinėjamo veleno galinio tvirtinimo mazgo elementai:

- guolis;
- veržlė;
- tvirtinimo žiedas;
- dangtelis.

### Elementų charakteristikos

Nr.6 guolio veržlė ir jos charakteristikos



2.6 pav. Centrinio veleno Nr. 6 guolio veržlė ir jos konstrukcija

Lentelėje 2.6 pateiktos pagrindinės turimos guolio veržlės charakteristikos.

Medžiaga iš kurios pagaminta veržlė: 17-4 PH plienas

**2.6 Lentelė.** Veržlės bendriniai duomenys.

Veržlės dalies numeris	DIM. B	DIM.J	DIM.K
<b>1853M92</b>	0.010 – 0.030 (0.25 – 0.76)	0.540 – 0.580 (13.72 – 14.73)	0.310 (7.87)
<b>9374M60</b>	0.010 – 0.050 (0.25 – 1.27)		

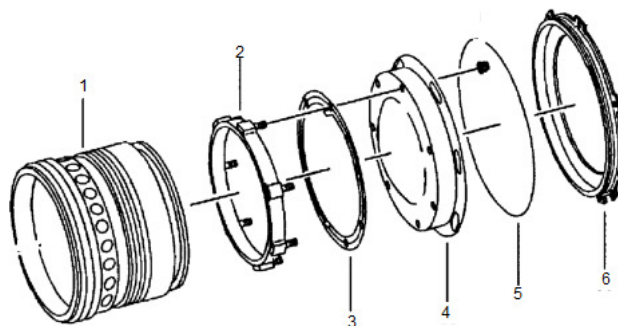
Tarpinis žiedas – sekantis mazgo elementas po veržlės. Elementas skirtas užrakinti veržlę pastovioje padėtyje ir neleisti jai atsisukti krintiniu atveju. Žiedas susideda iš centrinėje dalyje esančios guminės tarpinės ir dviejų kaiščių kurie įleidžiami į veleno gale esančius tarpelius.

### Probleminė mazgo vieta

Mazgo probleminė vieta apibrėžiama trijų pagrindinių elementų – veržlės, tarpinio žiedo ir alyvos dangtelio. Išspręsti problemai reikia išaiškinti šio mazgo surinkimo metodiką ir elementų konstrukcijas.

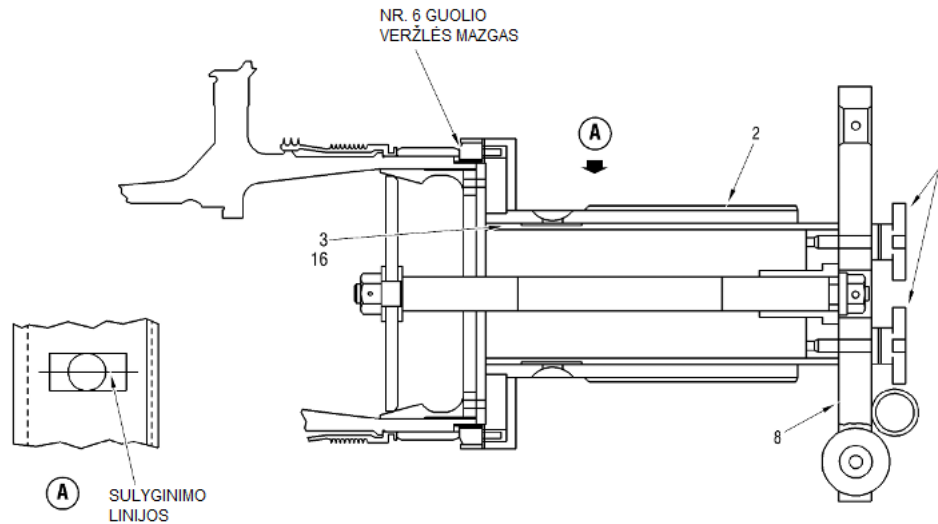
### Mazgo surinkimas

2.7 pav. nurodoma anksčiau pateiktų elementų išdėstymo tvarka ir kokia eilės tvarka jie surenkami.



**2.7 pav.** Nr.6 guolio tvirtinimo mazgo elementų išdėstymo tvarka. 1- velenas, 2 - veržlė, 3 – tvirtinamasis žiedas, 4 - dangtelis, 5 – tarpinė, 6 - karterio dangtis.

Nr. 6 guolio veržlė (2.7 pav.) tam skirtų specialių įrankių ir mechanizmų konstrukcijos (2.8 pav.) pagalba užveržiama jėgos momentu iki 600 lb. ft (814 Nm). Kad išlyginti ir veržlės padėti nustatyti tinkamą uždėti ir prispausti tarpiniam žiedui su užraktu, jėgos momentas gali būti padidintas, tačiau ne didesnis nei 1000 lb. ft (1355 Nm).



**2.8 pav.** Veleno Nr.6 guolio ir veržlės mazgo surinkimas. Schemoje pavaizduota mechanizmo konstrukcija su kuria surenkamas mazgas bei užsukama guolio veržlė. 2 – veržlės užsukimo arba atsukimo vamzdis, 3 – vamzdis su fiksuojamais grioveliais, kuris yra įstatomas į veleno vidinę dalį 8 – užsukimo jėgos momento perdavimo ir matavimo elementas, 9 – elementą laikantieji varžtai, 16 – vamzdis kuris įstatomas į veleno vidinę dalį, su plėstuvais. Vaizde A pavaizduotos vaizdo iš viršaus, esančios linijos esančios ant išorinio fiksuojamo vamzdžio ir vidinio vamzdžio kuris įstatytas į veleną, kad padėtų lengviau nustatyti guolio veržlės padėti. Tiksliai veržlės padėtis reikalinga vėliau uždėti žiedui su užraktu.

Sumodeliuoti ir pakeisti esamą guolio veržlę nauja būtų per brangu dėl techninės priežiūros naujos įrangos ir įrankių projektavimo. Todėl toliau darbe atliktas tarpinio žiedo modeliavimas ir stipruminiai skaičiavimai. Taip pat bandoma nustatyti veržlės medžiagos iš kurios yra pagaminta cheminių elementų sudėties kiekius, siekiant pagerinti atsparumą temperatūros poveikiams tačiau išlaikant stiprumines charakteristikas.

## 2.5 Galinio guolio konstrukcinio mazgo modeliavimas

Pagrindiniai Nr. 6 guolio mazgo modeliavimo etapai:

- nustatoma silpna mazgo vieta,
- apibrėžiami mazgo elementų pakeitimai,
- tarpinio žiedo tobulinimas ir užrakto kaiščių padėties laipsnių nustatymas,
- patobulintą elementą veikiančių jėgų ir charakteristikų pokyčių nustatymas.

## Konstruktinio mazgo silpnos vietos sprendimas

Konstruktinių mazgo elementų medžiagų tyrimas nėra galutinis problemos sprendimas. Užtikrinti, kad veržlės atsisukimo procesas reaktyviniame variklyje nepasikartotų ir padidinti mazgo patikimumą sumodeliuoti nauji mazgo elementai.

Konstruktiniame mazge, kad apsaugoti guolio veržlę nuo galimo atsisukimo yra išdėstyti du pagrindiniai elementai. Pirmas elementas – tarpinis žiedas su dviem auselėmis. Žiedo paskirtis užsandarinti ir užrakinti veržlę. Sekantis elementas – dangtelis uždengiantis guolio karterį ir tuo pačiu metu prispaudžiantis tarpinį žiedą prie guolio veržlės. Ankstesniu atveju susiduriant su guolio veržlės atsisukimo problema „CF6-80E“ varikliuose, šio tarpinio žiedo kaiščiai turintys neleisti atsisukti guolio veržlei buvo užlenkiami, glemžiami tarp veleno ir atsisukančios veržlės esančiuose tarpeliuose. Elementai turi būti sustiprinti, tiek žiedas tiek dangtelis.

Šiuo atveju tarp veleno ir guolio veržlės žiedo kaiščių, kuomet jie yra pažeidžiami, vyksta kirpimas ir glemžimas. Mazgo elementas deformuojamas vien skersinėmis jėgomis, vyksta kirpimas. Kerpant kūną, skersinės jėgos veikia viena priešais kitą, o atstumas tarp jų yra labai mažas[1]. Galintis atsirasti lenkimo momentas irgi yra pernelyg mažas[1].

Skerspjuvyje veikiantys atsiradę tangentiniai įtempiai pasiskirsto nevienodai, tačiau inžineriniuose skaičiavimuose laikomi vidutiniais ir išreiškiami formule(2.2). Apskaičiuojami atsirandantys įtempiai veikiant skersinėms jėgoms.

$$\tau_{vid} = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

Žiedo kaiščiai kurie yra įleisti į veleno tarpelius liečiasi tarpusavyje. Susilietimo vietoje susidaro sudėtingas įtempių pasiskirstymas. Šie įtempiai vadinami glemžimo įtempiais.

Šie įtempiai gali būti apskaičiuoti formule(2.3):

$$\sigma_{v.g} = \frac{F}{A} = \frac{F}{td} \quad (2.3)$$

Sumodeliuoti elementai:

- tarpinis žiedas su užraktu prie veržlės(*Integral ring*). Reikalingi skaičiavimai, kad nustatyti dar vienos auselės padėtį ant žiedo.
- dangtelis(*Bearing oil slinger*). Sumodeliuotas pagal naują tarpinį žiedą.

Pagal naujus matmenis sumodeliuoti konstrukciniai elementai - sustiprinti, todėl gali atlaikyti didesnes apkrovas.

Atliktų skaičiavimų ir gautų matmenų duomenis išsamiau pateikti modeliavimo etape.

### **Konstrukcinio mazgo tobulinimas ir modeliavimas**

Modeliavimo etapai:

1. papildomo užrakto padėties pagal laipsnius skaičiavimas;
2. užraktų storio nustatymas;
3. žiedo storio nustatymas;
4. prispaudžiančio žiedą dantelio matmenų nustatymas.

#### **PAPILDOMO UŽRAKTO PADĖTIES PAGAL LAIPSNIUS NUSTATYMAS.**

Guolio žiedo veržlė užsukama nustatytu jėgos momentu. Vėliau ant veržlės užmaunamas tarpinis žiedas. Remiantis nurodytais duomenimis, veržlė turi 7 įsukamus kaiščius su sriegiais užsukti veržlėms, kurios neleistų judėti ir prispaustų prie guolio veržlės tarpinį žiedą su kaiščiais į veleną ir guolio karterio dangtelį.

Taip pat ir tarpinis žiedas turi 7 skylės leidžiančias šį uždėti ant veržlės.

Kiekvienas taškas išdėstytas kas  $51.428^\circ$

Kiek sudėtingesnis yra tarpinio žiedo kaiščių išdėstymas, skirtų užrakinti ir apsaugoti guolio veržlę nuo atsisukimo dėl vibracijų ir temperatūros poveikio.

Gamyklinio žiedo vieno iš dviejų kaiščių padėtis visada yra ties kuria nors žiedo skylė skirta perkišti ir uždėti ant guolio veržlės. Sekančio padėtis yra  $180^\circ$  atstumu pagal laikrodžio rodyklę kryptimi.

Dėl šios priežasties, užsukant guolio veržlę svarbu nustatyti ir tinkama veržlės padėti, kad kaiščiai persikištų į veleno tarpelius. Kada reikia nuo nustatyto užsukimo jėgos momento leidžiama veržlę paveržti, tačiau neviršyti didžiausios leistinos ribos.

Tarpeliai skirti žiedo kaiščiams išdėstyti kas  $22.5^\circ$ . Velene yra 16 tarpelių. Todėl naudojant žiedą su dviem kaiščiais yra tik viena galimybė uždėti.

## Konstruktinius elementus veikiančios jėgos ir charakteristikų pokyčiai

Sumodeliavus užrakinimo konstrukcinį elementą pasikeitė kaiščių skaičius ir tarpinio žiedo storis bei kaiščio storis. Sumodeliuojami papildomi du kaiščiai prie esamų. Tarpinio žiedo storis padidintas 5 mm ir kaiščio storis padidintas 2 mm. Veržlės atsisukimo metu kaiščius veikiančios jėgos pasiskirsto keturiems kaiščiams.

Užsukant guolio Nr.6 veržlę, kad būtų galima sulygiuoti veržlės tinkamą padėtį su kaiščiais ir veleno tarpeliais buvo nustatytos kaiščių tikslios padėties (padėtis atidedama nuo pagrindinio kaiščio kurio padėtis sutampa su skylės padėtimi):

Pirmo papildomo kaiščio padėtis	67.5°
Antro papildomo kaiščio padėtis	247.5°
Mažiausias veržlės užsukimo momentas	814 Nm
Atstumas nuo veleno centro	0.23 m

Bendra jėga veikianči užrakinimo kaiščius:

$$F = \frac{814}{0.23} = 3.539 \text{ kN}$$

Kiekvienam užrakinimo kaiščiui atskirai tenkanti jėga:

$$F_{1,2,3,4} = \frac{3539}{4} = 884,75 \text{ N}$$

Tarpinio žiedo medžiaga	17-4P A286
Paviršiaus padengimas	nėra



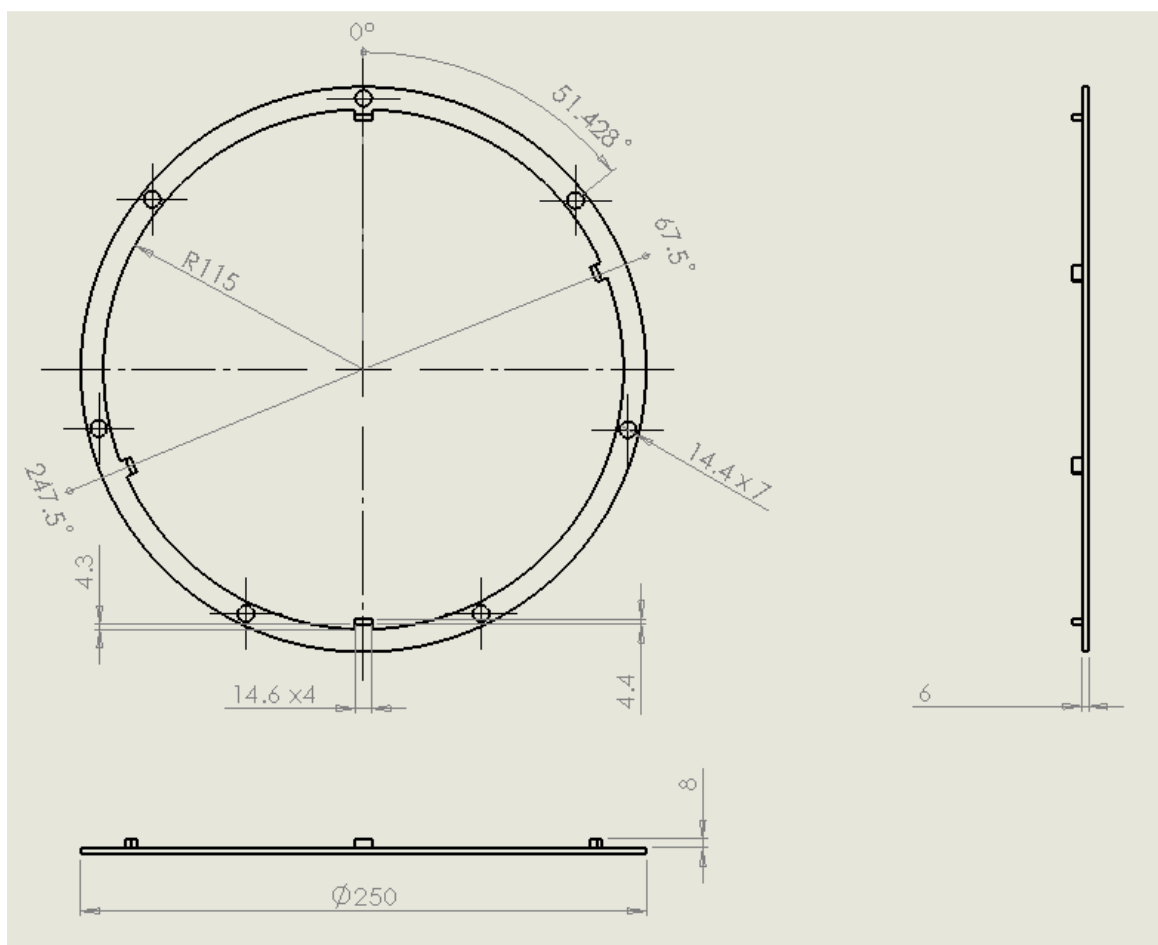
## 2.6 Galinio karterio mazgo stipruminiai skaičiavimai

Pirmiausia buvo sumodeliuoti nauji mazgo elementai – tarpinis žiedas su užraktu ir žiedą prie veržlės prispaudžiantis dangtelis. Modeliavimui atlikti buvo pasinaudota SOLIDWORKS programine įranga.

*Sumodeliuotas konstrukcinis mazgas*

*Integral ring – tarpinis žiedas*

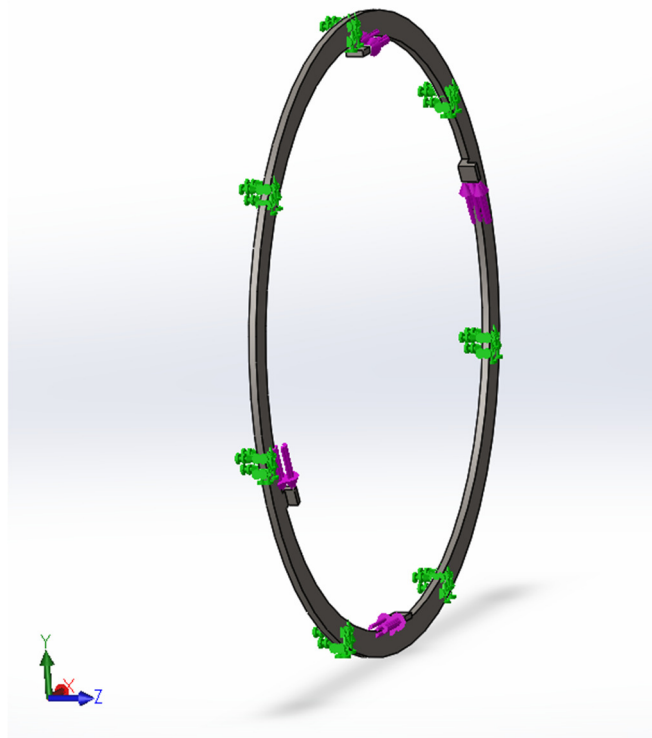
Toliau pateikta tarpinio žiedo su užraktu modelis (žr. 2.4 pav.).



**2.9 pav.** guolio nr.6 veržlės tarpinio žiedo su užraktu modelis. Vaizdai iš galo ir šonų su pagrindiniais matmenimis (mm).

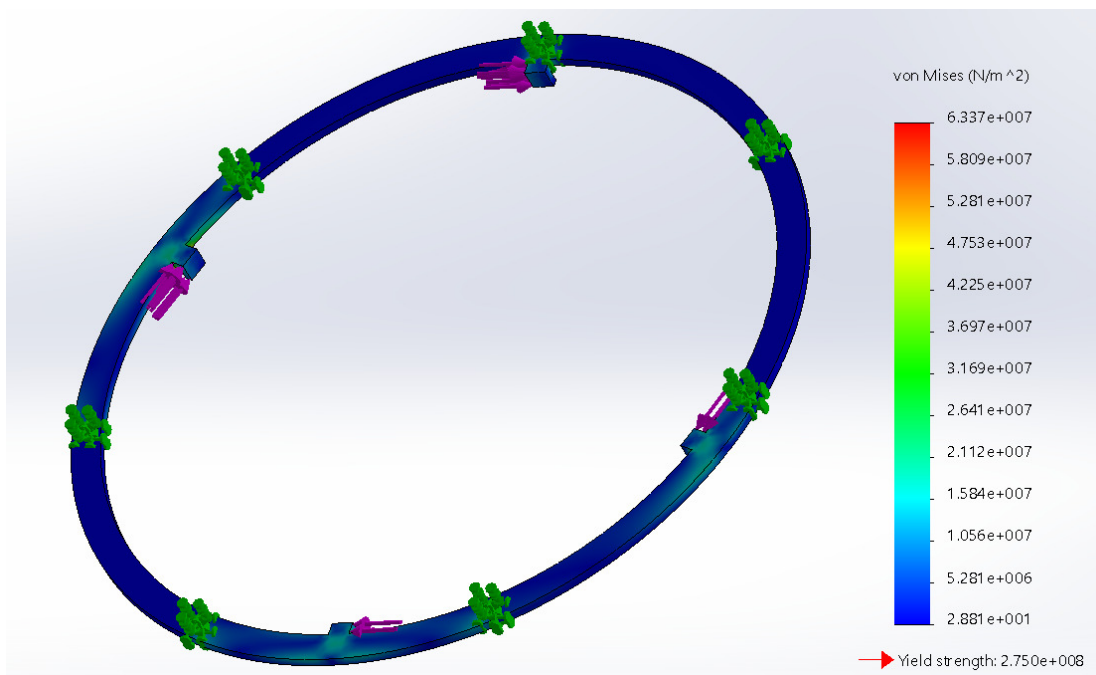
### Modeliavimas

Toliau atliekami stipruminiai skaičiavimai. Nustatomi sumodeliuotų elementų įtempiai, poslinkiai ir deformacijos. Pradžioje nurodomos elementus veikiančių jėgų kryptys.

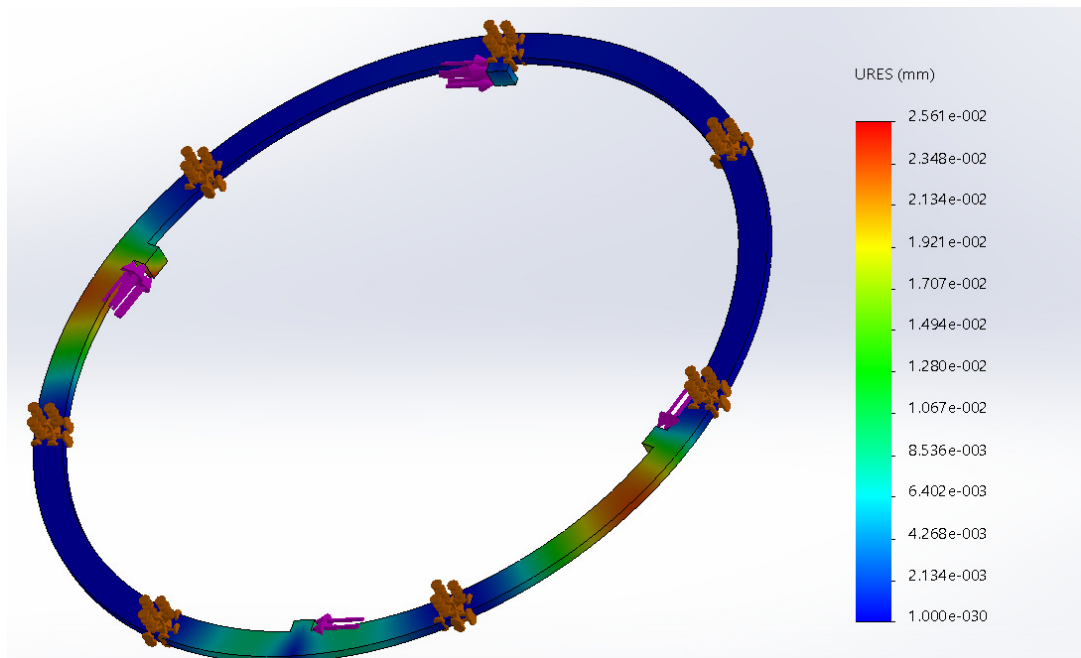


2.10 pav. Tarpinį žiedą veikiančios jėgos ir įtvirtinimo vietos prie veržlės

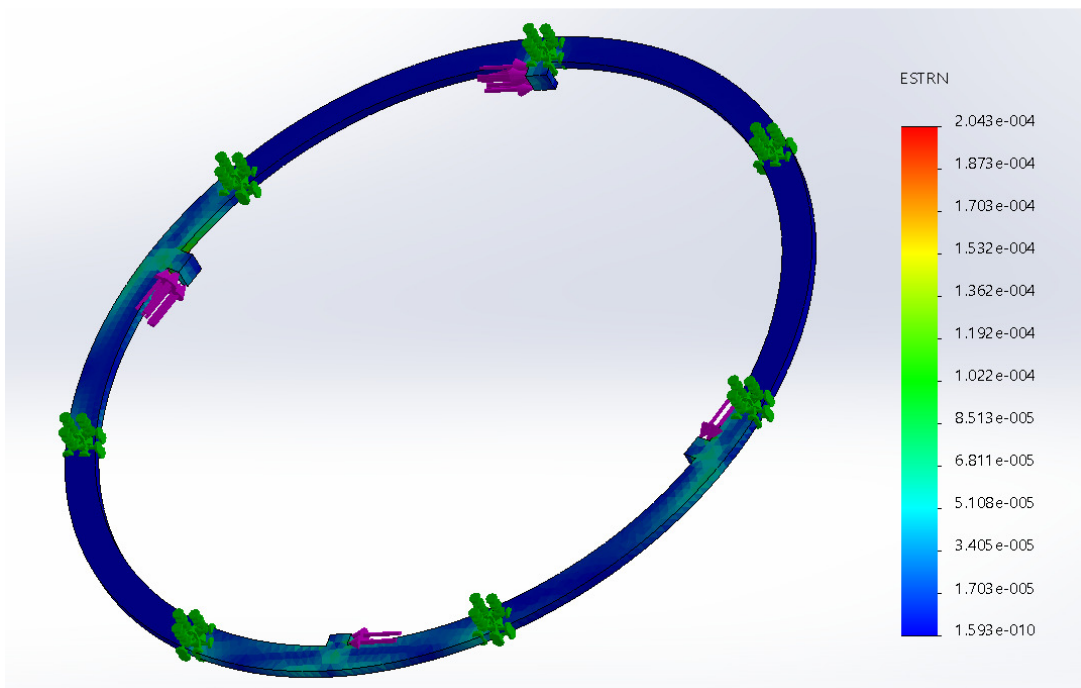
- Atliekami stipruminiai mazgo elementų skaičiavimai.
- Patikrinamos mazgo elementų statinės apkrovos.



2.11 pav. Jėgos veikiančios tarpinį žiedą veržlės atsisukimo metu



2.12 pav. Veržlės tarpinio žiedo poslinkiai atsisukimo metu



2.13 pav. Veržlės atsisukimo metu tarpinio žiedo deformacijos

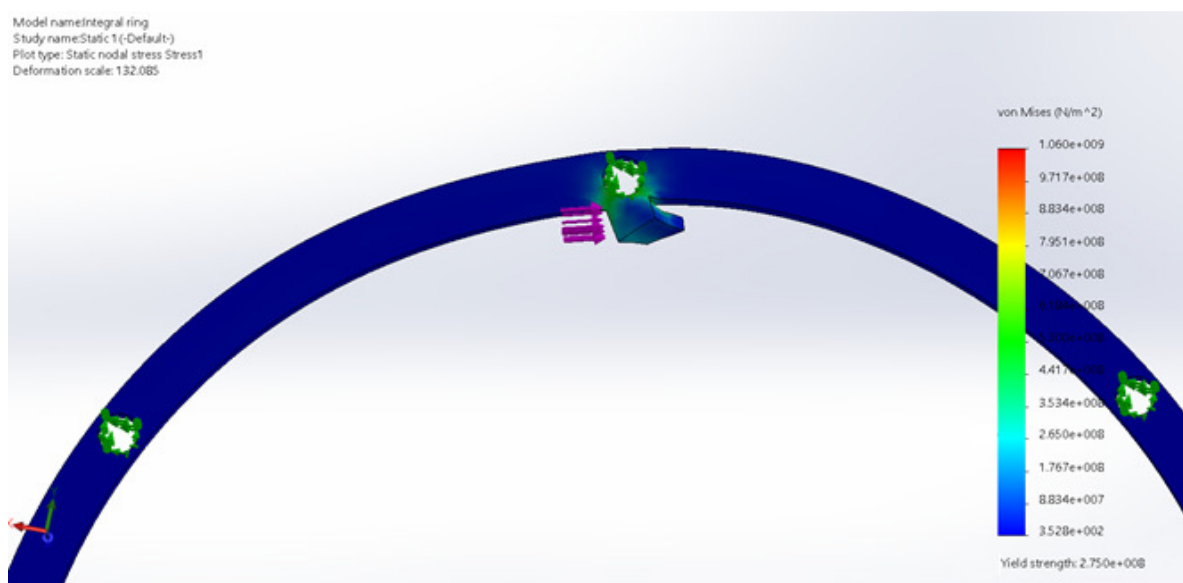
Remiantis kompiuteriniu modeliavimu, kuris buvo atliktas SOLIDWORKS programine įranga gauna, kad:

- Maksimali riba yra 63,37 MPa
- Maksimalūs poslinkiai 2,56e-002 mm
- Maksimalios deformacijos 2.043e-004 mm

Atlikus šį kompiuterinio modeliavimo projekto etapą, nustatytos minimalios ir maksimalios apkrovos ribos.

Patikrinus apkrovas sumodeliuotas tarpinis žiedas (*Integral Ring*) iš pasirinktos medžiagos atlaiko, nes stiprumo ribos 275 MPa nepasiekia.

**Svarbu paminėti, atikus kompiuterinį modeliavimą (*INTEGRAL RING*) elementui su standartiniais šiuo metu naudojamais dviem kaiščiais, nustatyta kad stiprumo riba viršija leistiną stiprumo ribą keletą kartų. Todėl su sumodeliuotu nauju tarpiniu žiedu ir didesniu kaiščių skaičiumi kritiniu atveju guolio veržlei nebus leista atsisukti.**



**2.14 pav.** Originalus tarpinis žiedas su dviem užraktais ir jį veikiančios jėgos veržlės atsisukimo metu.

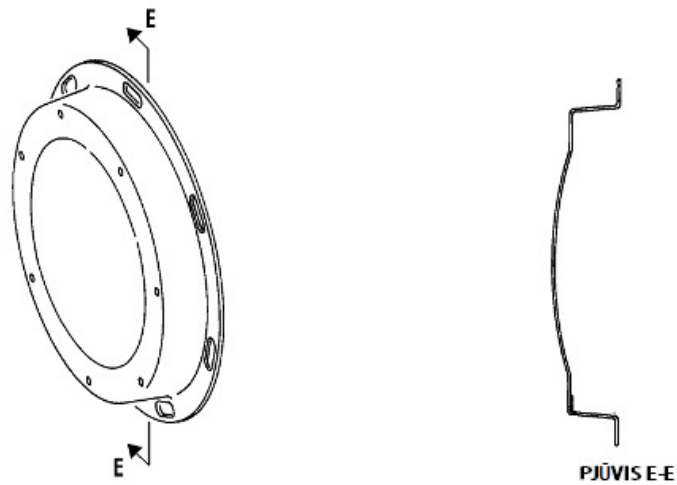
## Dangtelio modeliavimas ir stipruminiai skaičiavimai

Dangtelis atlieka dvi pagrindines funkcijas guolio mazge: uždaro galinį karterį ir prispaudžia tarpinį žiedą, neleisdamas jam pasislinkti nuo veržlės ir taip užsandarindamas karterį.

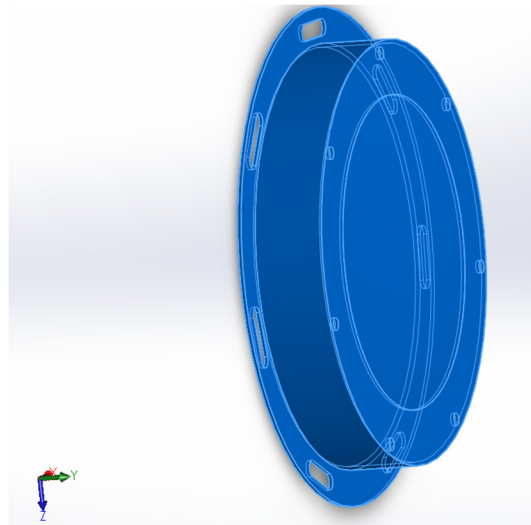
Darbe sumodeliuotas 2 mm žemesnio profilio dangtelis (įvertinus pasikeitimus tarpinio žiedo matmenis) bei pakeistas paviršiau išgaubtumas. Skersmuo padidintas nuo 175mm iki 185mm. Atlikti stipruminiai skaičiavimai.

Medžiaga: AMS 5510

Paviršiaus padengimas: nėra



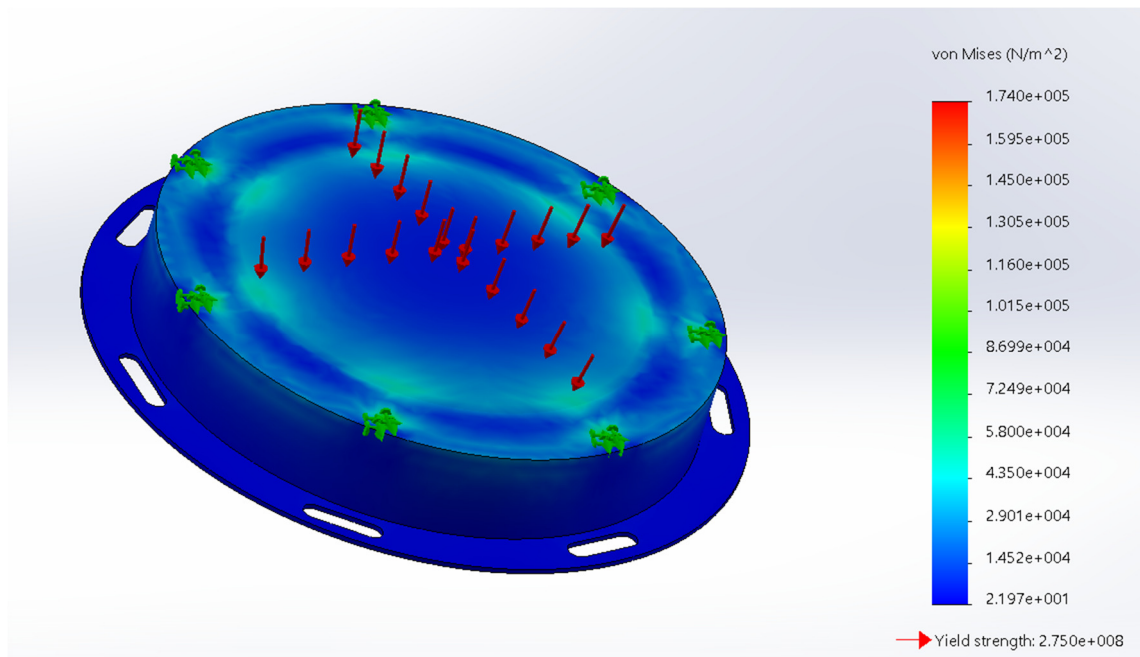
2.15 pav. D karterio dangtelis ir pjūvis



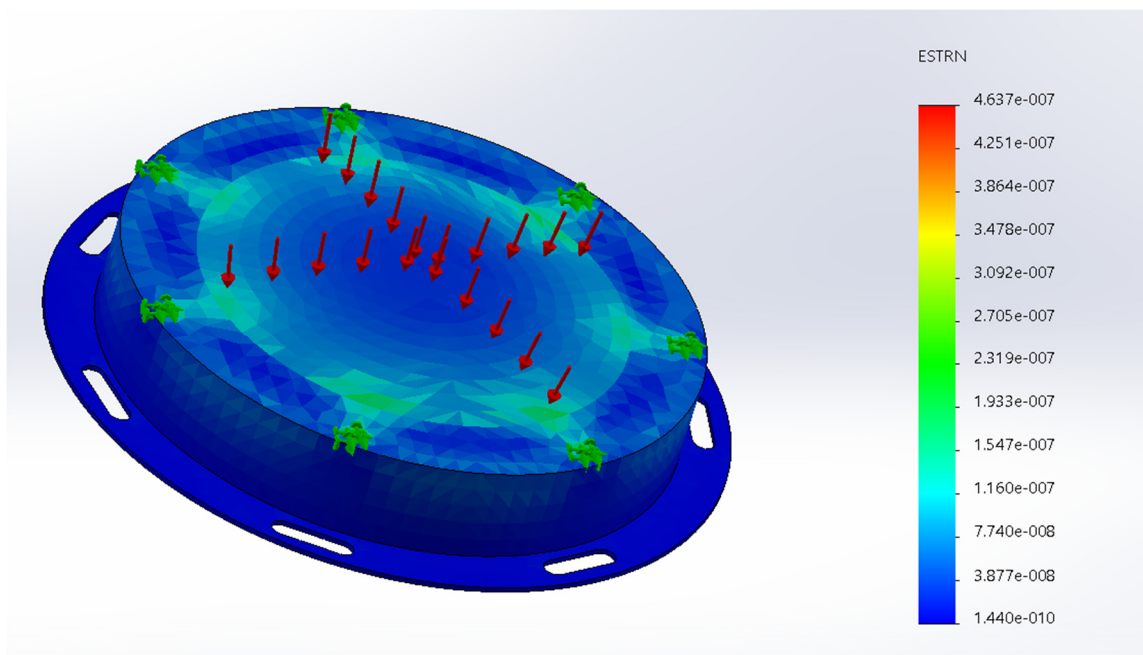
2.16 pav. sumodeliuotas D karterio alyvos sandarinimo ir paskirstymo dangtelis

Sumodeliuotas sandarinimo dangtelis „SOLIDWORKS“ programine įranga įtvirtinamas septyniuose tvirtinimo taškuose. Darbinis paviršiaus plotas (iš priekinės dalies į galą) apkraunamas pagal gamintojo dokumentacijoje pateikiamus duomenis,  $70 \text{ N/m}^2$ .

Nustatomos guolio karterio dangelį veikiančios jėgos ir deformacijos. Taip pagrindiniai duomenys reikalingi tyrimui. Slėgis į darbinį paviršių sudaromas, paduodant orą iš (*Bore Cooling*) ventiliatoriaus modulio galinės pakopos. Paduodamo oro paskirtis pateikta eksploatacinėje projekto analizėje.



2.17 pav. D karterio alyvos sandarinimo dangtelį veikiančios jėgos



2.18 pav. D karterio alyvos sandarinimo dangtelio deformacijos

Remiantis centrinio veleno D karterio nr.6 guolio mazgo alyvos sandarinimo dangtelio kompiuteriniu modeliavimu nustatyta:

- maksimali pasiekta riba yra 17.4 MPa
- maksimalios deformacijos 4.637e-007

## ATSARGOS KOEFICIENTAS

Kuo koeficientas didesnis tuo konstrukcija tvirtesnė ir atsparesnė smūgiams ir sukretimui. Atsargos koeficientas aviacijoje naudojamoje technikoje, šiame tyrime aviacinio reaktyvinio variklio konstrukcinių sistemų, turi būti daugiau nei 2.

$$n = f / \Phi \quad (2.4)$$

čia:

$n$  – atsargos koeficientas;

$f$  – maksimali stiprumo riba (MPa);

$\Phi$  – gauta stiprumo riba (MPa).

Kai veleno tvirtinimo mazgo elementai surinkti:

$$n = \frac{275}{63,37} = 4,3395$$

Atsižvelgiant į tai, kad šis elementas patiria vibracijas ir temperatūrų pasikeitimus ir turi būti labai patikimas, atsargos koeficientas turi būti didelis. Atlikus skaičiavimus atsargos koeficientas gaunamas didesnis nei 2, todėl toks atsargos koeficientas reaktyvinio variklio konstrukcijoje yra visiškai patikimas.

Remiantis gautais rezultatais projekto pabaigoje atsižvelgiant į skaičiavimus pateiktos išvados ir apibendrinimai.

### 3 Variklio darbo parametrų skaičiavimai

Reaktyviniai varikliai yra labai jautrūs darbo sąlygų pokyčiams. Į tai buvo atkreipta šio darbo eksploatacinės analizės dalyje (žr. 1.3 lentelę). Kad paprasčiau apibrėžti tokių darbo sąlygų pokyčius galima suskirstyti į atskirus skyrius.

Pokyčių skyriai:

1. Pokyčiai kurie priklauso nuo variklio dizaino charakteristikomis;
2. Pokyčiai kurie priklauso nuo variklio darbo charakteristikų;
3. Pokyčiai susiję su variklio darbo vidine terpe.

Prie svarbiausių pokyčių labai svarbu priskirti variklio modulių leistinas temperatūras. Pagrindiniai reikalavimai, keliami reaktyviniams varikliams – didelė trauka esant mažam variklio svoriui. Todėl turi būti pasiektas didelis traukos ir svorio santykis. Tai pasiekama didinant temperatūrą prieš turbiną – iki 1400 °C ir daugiau. [18]

Tai galima pasiekti pagerinus turbinos medžiagų atsparumą, atsižvelgiant ne tik į pažangius aušinimo metodus, tačiau ir medžiagas iš kurių turbinos elementai bei komponentai yra pagaminti. Tyrime pasirinkta guolio veržlės medžiaga pasižyminti aukštesniu tvermės rodikliu.

Temperatūra skirtingai veikia turbinos komponentus bei detales. Dėl didžiausio tenkančio terminio krūvio ir nuovargio gali tie komponentai sugesti. Terminis nuovargis – procesas atsirandantis dėl darbo temperatūros ciklų kaitos. Kiekvieno starto metu temperatūra staigiai padidėja. Esant didelei terminei įtampai, kai kurios dalys gali net deformuotis. Tokia situacija verčia kurti naujas medžiagas galinčias atlaikyti aukštas temperatūras.[18]

Šiuose darbo skyriuose nustatytos modulių darbo temperatūros ir gauti rezultatai palyginti su gamintojo leistiniais diapazonais. Atsižvelgiant į pasikartojančius guolio mazgo pažeidimus ir pavojų saugumui, nustatyti ir leistini variklio darbo ciklai iki kurių turi būti atliktos papildomos patikros žemo slėgio sistemos veleno guolio mazgui.



### 3.1 Variklio darbo temperatūra

Remiantis metodine medžiaga [10] ir variklio „CF6-80E” gamintojo medžiaga [21] toliau nustatomos turboventiliatorinio variklio modulių įėjimo ir išėjimo darbo temperatūros pakilo metu.

Nustatomos ventiliatoriaus, kompresoriaus, degimo kameros, turbinos ir dujų išmetimo temperatūrų santykiai ir temperatūros.

*Ventiliatoriaus įėjimo:*

Ventiliatoriaus slėgimo koeficientas  $p_{rf} = 1.68$

Ventiliatoriaus specifinės šilumos santykis  $\gamma_f = 1,403$

Ventiliatoriaus adiabatinis naudingumas  $\eta_f = 0.94$

Ventiliatoriaus korpuso adiabatinis naudingumas  $\eta_{fn} = 0.93$

Dujų konstanta  $R_f = 287 \text{ J}/(\text{Kg K})$  (Sauso oro – 287)

Ventiliatoriaus įėjimo temperatūra  $T_a = 287 \text{ K}$

*Žemo slėgio kompresoriaus ir ventiliatoriaus pakopos išėjimo:*

$$c_{pf} = \frac{\gamma_f}{\gamma_f - 1} R_f \quad (3.1)$$

$$h_{of} - h_{efs} = c_{pf} T_{of} \left( 1 - \left( \frac{p_{of}}{p_a} \right)^{\frac{1-\gamma_f}{\gamma_f}} \right) \quad (3.2)$$

$$u_{ef} = \sqrt{2\eta_{fn}(h_{of} - h_{efs})} \quad (3.3)$$

arba

$$u_{ef} = \sqrt{2\eta_{fn} \frac{\gamma_f}{\gamma_f - 1} R_f T_{of} \left[ 1 - \left( \frac{p_{of}}{p_a} \right)^{(1-\gamma_f)/\gamma_f} \right]} \quad (3.4)$$

Panašiai:

$$u_e = \sqrt{2\eta_n \frac{\gamma_n}{\gamma_n - 1} R_n T_{ot} \left[ 1 - \left( \frac{p_{ot}}{p_a} \right)^{(1-\gamma_n)/\gamma_n} \right]} \quad (3.5)$$

*Gaunama (ventiliatoriaus išėjimo):*

Ventiliatoriaus išėjimo temperatūra  $T_{of} / T_a = 1.9320$       Temperatūra  $T = 296.42$  K

Ventiliatoriaus išėjimo slėgis  $p_{of} / p_a = 101.2$

Ventiliatoriaus pakopos dujų greitis  $u_{ef} = 4803.3$  m/s

*Kompresoriaus įėjimo:*

Kompresoriaus slėgio laipsnis  $p_{rc} = 18.9$

Kompresoriaus specifinės šilumos santykis  $\gamma_c = 1.4$

Kompresoriaus adiabatinis naudingumas  $\eta_c = 0.89$

$$\frac{p_{oc}}{p_{aa}} = \frac{p_{lod}}{p_a} p_{rc} \quad (3.6)$$

$$\frac{T_{ocs}}{T_{od}} = p_{rc}^{(\gamma_c - 1)/\gamma_c} \quad (3.7)$$

$$T_{0c} = T_{od} + \frac{1}{\eta_c} (T_{ocs} - T_{od}) \quad (3.8)$$

arba

$$T_{0c} = \left( 1 + \frac{1}{\eta_c} \left( p_{rc}^{\frac{\gamma_c - 1}{\gamma_c}} - 1 \right) \right) T_{od} \quad (3.9)$$

*Kompresoriaus išėjimo:*

Kompresoriaus išėjimo temperatūra  $T_{0c}/T_{a} = 0.307$       Temperatūra  $T = 724.8 \text{ K}$

Kompresoriaus išėjimo slėgis  $p_{0c}/p_a = 14.8$

*Degimo kameros:*

Degimo slėgio koeficientas  $r_b = 1.01$

Įėjimo temperatūra  $T_{0b} = 724.8 \text{ K}$

Šiluminis naudingumas (reakcijos)  $\eta_b$   $Q_R = 1500 \text{ kJ/kg}$  (šiemis varikliams naudojamo aviacinio kuro  $Q_R = 1005$ )

$$f = \frac{T_{0b} - T_{0c}}{\left(\frac{\eta_b Q_R}{c_p}\right) - T_{0b}} \quad (3.10)$$

*Degimo kameros išėjimo:*

Snaudoto oro ir kuro santykis degimo kameroje  $f = 0.005$

Temperatūra  $T_{0b}/T_a = 1.17$       Temperatūra  $T = 1510.0 \text{ K}$

Slėgis  $p_{0b}/p_a = 15.032$

*Turbinos įėjimo:*

Specifinė šiluma (turbina)  $\gamma_t = 1.333$

Turbinos adiabatinis naudingumas  $\eta_t = 0.95$

Išorinio srauto koeficientas  $\beta = 5.15$

*Turbinos:*

$$\frac{p_{ob}}{p_a} = \frac{p_{oc}}{p_a} r_b \quad (3.11)$$

$$T_{0t} = T_{0b} - (T_{0c} - T_{0d}) - \beta(T_{0f} - T_{0d}) \quad (3.12)$$

$$T_{0ts} = T_{0b} \frac{1}{\eta_t} (T_{0t} - T_{0t}) \quad (3.13)$$

$$\frac{p_{0t}}{p_{ob}} = \left( \frac{T_{0ts}}{T_{0b}} \right)^{\gamma_t / (\gamma_t - 1)} \quad (3.14)$$

arba

$$\frac{p_{0t}}{p_a} = \frac{p_{ob}}{p_a} \left( 1 - \frac{1}{\eta_t} \left( 1 - \frac{T_{0t}}{T_{0b}} \right) \right)^{(\gamma_t / (\gamma_t - 1))} \quad (3.15)$$

*Turbinos išėjimas:*

Temperatūra  $T_{0t} / T_a = 4.15$

Dujų temperatūra – 1697.0 K

Slėgis  $p_{0t}/p_a = 0.924$

*Išmetimo dujų:*

Specifinė šiluma (išmetimo)  $\gamma_n = 1.33$

Išmetimo tūtos naudingumas  $\eta_n = 0.96$

Dujų konstanta (išmetimo tūtos)  $R_n = 287 \text{ J/(kg K)}$

Dujų konstanta (oro)  $R = 287 \text{ J/(kg K)}$

$$u = M\sqrt{\gamma RT_a} \quad (3.16)$$

$$\frac{F}{m_a} = ((1 + f)u_e + \beta u_{ef} - (1 + \beta)u) \quad (3.17)$$

$$TSFC = fm_a/F \quad (3.18)$$

$$\eta_p = 2u((1 + f)u_e + \beta u_{ef} - (1 + \beta)u)/((1 + f)u_e^2 + \beta u_{ef}^2 - (1 + \beta)u^2) \quad (3.19)$$

$$\eta_{th} = ((1 + f)u_e^2 + \beta u_{ef}^2 - (1 + \beta)u^2)/(2fQ_R) \quad (3.20)$$

$$\eta_o = \eta_p \eta_{th} \quad (3.21)$$

*Išmetimo tūtos išėjimas:*

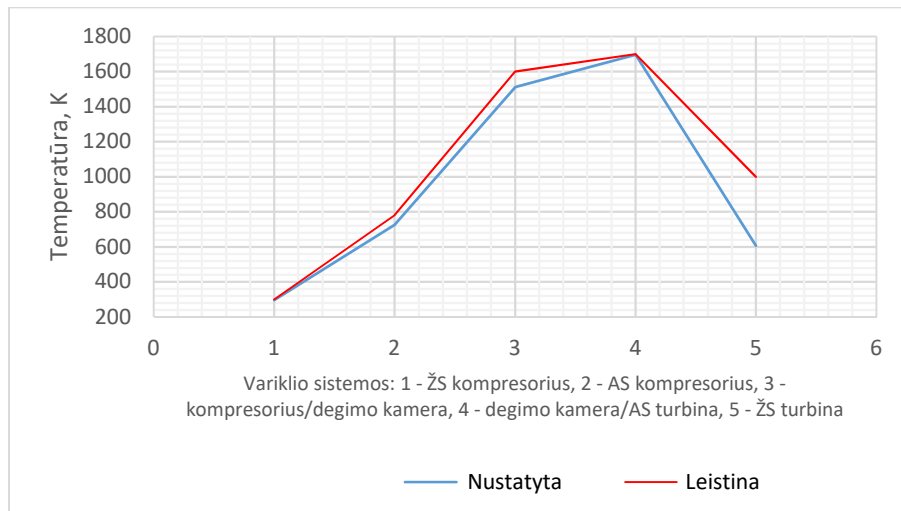
Slėgis  $p_{0e}/p_a = 7.09$

Išmetimo temperatūra  $T_{0e} = 607.8 \text{ K}$

Išmetimo dujų greitis  $u_e = 239.4 \text{ m/s}$

Darbo temperatūrų rezultatai:

- Ventiliatoriaus modulio dujų temperatūra – 296.42 K
- Kompresoriaus modulio dujų temperatūra – 724.8 K
- Degimo kameros išeinančių dujų temperatūra – 1510.0 K
- Turbinos darbo temperatūra – 1697.0 K
- Išmetimo tūtos temperatūra – 607.8 K



**3.1 pav.** Variklio darbo temperatūrų analizė

Nustatyta žemo slėgio turbinos darbo temperatūra – 1697.0 K

Remiantis gamintojo pateikiama medžiaga ir didžiausiais leistiniais temperatūrų diapazonais, atliktas temperatūrų palyginimas. Pateiktame (žr. 3.1 pav.) grafike pateiktos nustatytos ir gamintojo leistinos temperatūrų kreivės. Arčiausiai nustatytos leistinos ribos temperatūra priartėja degimo kameros/AS turbinos dalyje.

Leistina temperatūros riba tiek turbinoje tiek kituose moduluose nepasiekama.

### 3.2 Leistini variklio darbo ciklai

Toliau atliekami skaičiavimai reikalingi apriboti skrydžio ciklų skaičių iki techninio aptarnavimo kurio metu turi būti atliekamas turbinos patikrinimas. Skaičiavimai atliekami atsižvelgiant į guolio veržlės atsisukimo procesą.

Skaičiavimai paremti variklių gamintojo inžinerinio projektavimo ciklų skaičiavimo metodika.[11]

Bendri gedimo metu atlikti ciklai = ciklų skaičius skrydžių metu tuo metu esant 7 pakopos aušinimo gedimui

Pakoreguotas ciklų skaičius = Bendras ciklų skaičius gedimo metu padaugintas iš 0.6

Bendras ciklų skaičius = Praskraidyti ciklai + Pakoreguotas ciklų skaičius [24]

Taikant apibrėžimus atliekami skaičiavimai ir nustatomi leistinų ciklų pakeitimai.

Duomenys skaičiavimams ir ciklų nustatymui pateikiami iš „C2“ ir „E“ variklių techninės dokumentacijos.

Bendras atliktų ciklų skaičius = 1,000

Bendri gedimo metu atlikti ciklai = 150

Pakoreguotų ciklų skaičius =  $150 \times 0.6 = 90$

Bendras ciklų skaičius =  $1,000 + 90 = 1,090$

Nustatyta, kad bendras leistinų ciklų skaičius iki patikrinimo ne daugiau nei 1 090 ciklų.

Anksčiau nustatyta riba 4700 ciklų.

Remiantis nustatytas ciklais rekomenduojama sumažinti esamą ciklų skaičių 3610 ciklų.

## IŠVADOS IR APIBENDRINIMAI

Atlikto tyrimo, modeliavimo bei skaičiavimų pagrindu pateiktos galutinės darbo išvados.

- 1 atlikta technologinio lygio eksploatacinė analizė ir eksperimentinis variklių velenų tyrimas. Remiantis variklių velenų parametrais ir eksperimentiniu tyrimu nustatyti veleno tvirtinimo mazgo gedimai ir 4600 (*EFC*) ciklų riba iki viršytų leistinų guolio poslinkių;
- 2 įvertinus variklio veleno mazgo pažeidimus nustatyta, kad reikia pakeisti mazgo konstrukcinius elementus. Remiantis mazgo parametrais sumodeliuoti sustiprinti šio mazgo konstrukciniai elementai, tarpinis sandarinimo-veržlės užrakinimo žiedas su keturiais kaiščiais ir alyvos sandarinimo-paskirstymo dangtelis. Mazge esančios guolio veržlės gamybos medžiaga pasirinktas konstrukcinis plienas – 17-4 P 5643;
- 3 nustatytas tarpinio sandarinimo-veržlės užrakinimo žiedo kaiščių išdėstymas  $0^\circ$ ,  $67.5^\circ$ ,  $180^\circ$  ir  $247.5^\circ$  padėtyse veržlės pasukimo ir veleno atžvilgiu;
- 4 atlikus atsparuminių charakteristikų tyrimą sumodeliuotiems mazgo elementams nustatyta, kad tarpinio veržlės užrakinimo ir sandarinimo žiedo maksimali įtempių riba yra 63,37 MPa, mazgo alyvos sandarinimo ir paskirstymo dangtelio maksimali pasiekta riba 17,4 MPa. Nustatyti atsparuminių charakteristikų rezultatai tenkina mazgo elementams keltas stiprumo sąlygas;
- 5 nustatyta didžiausia variklio temperatūra 1697.0 K. Remiantis atliktu variklio apskaičiuotų ir leistinų darbo temperatūrų tyrimu nustatyta, kad turbinos darbo temperatūra pakilimo metu priartėja prie leistinos darbo temperatūros, tačiau jos neviršija;
- 6 atliktas variklio skrydžių ciklų skaičiavimas ir nustatytas rekomenduojamas didžiausias leistinas 1090 ciklų skaičius, kuriam priartėjus turi būti atliekama papildoma mazgo techninė patikra.



## INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SARAŠAS

1. Antanas Žiliukas. Medžiagų mechanika. Mokomoji knyga. Kaunas: Technologija, 2004. 595 p.
2. Juozas Zujus. Reaktyviniai varikliai: mokomoji knyga. Vilnius: technika, 2004. 308 p.
3. Morgan, Howard E. Turbojet Fundamentals. New York McGraw – Hill Book company, 1958. 104 p.
4. Evaldas Narvydas. Kompiuterinė konstrukcijų analizė: principai ir tipiniai pavyzdžiai. KTU leidykla Technologija, 2011. 168 p.
5. D.Y Davis, E.M. Stearns. Energy Efficient Engine. Final Design and analysis. NASA CR-168219, August 1985, 174 p.
6. D. Eckardt. Future engine design trade offs. X ISOABE, Sept. 1991. 74 p.
7. A. Jankūnas, M. Randomanskas, J. Vileišis. Velenai, Slidimo guoliai. Vilnius – 1980 103p.
8. G. Panagiotis. Design space exploration and performance modelling of advanced turbofan and open-rotor engines. Cranfield University, 2013 207 p.
9. William Eccles. Aspects of the Self-Loosening of Threaded Fasteners. Jost Institute for Technology university of Central Lancashire. July 2010, 179 p.
10. P.G and C.R Peterson. Mechanics and thermodynamics of Propulsion, Addison-Wesley. 1970 prieiga per internetą: [www.flowillustrator.com/turbofan-calculator-meth/](http://www.flowillustrator.com/turbofan-calculator-meth/)
11. K.H Liew, E. Urip, S.L. Yang. Performance Cycle Analysis for Turbofan Engine with Interstage Turbine Burner. Michigan Technological University. July 2005, 80 p.
12. R. Friede, J. Lange. Self loosening of prestressed bolts. NSCC 2009, 8 p.
13. N.G Pai, D.P Hess. Experimental study of loosening of threaded fasteners due to dynamic shear loads. Journal of Sound and Vibration. 6 June 2001, Pages 585-602
14. Gordon C. Oates. Aircraft Propulsion Systems Technology and design. American Institute of Aeronautics and Astronautics 1989, 528 p.
15. J. D. Mattingly. Elements of Propulsion: Gas Turbines and Rockets. American Institute of Aeronautics and astronautics Inc. Blacksburg, Virginia Jan 1, 2006, 909 p.
16. Hunecke, Klaus. Jet Engines: Fundamentals of theory, design and operation. Zenith Press 1997, Dallas, TX
17. Thomas W. Wild, Micheal J Kroes. Aircraft powerplants. McGraw-Hill Education, 2013, 768 p.
18. Scot Michael. Modelling and Simulation of a dynamic turbofan engine. B.S. The University of Akron, 2010, 167 p.

19. Luis Gallar. Gas Turbine Shaft Over-speed/ Failure Performance Modelling. Cranfield University 2007, 294 p.
20. Aikaterini Psarra. Gas Turbine shaft failure modelling. Friction and wear modelling of turbines in contact. Cranfiel University 2010, 211 p.
21. Turboventiliatorinio variklio sistemų analizė. Straipsnis-publikacija. [ Žiūrėta : 2018-02-12 ] Prieiga per internetą:  
[https://www.researchgate.net/publication/306082636\\_PERFORMANCE\\_ANALYSIS\\_OF\\_HI\\_GH\\_BYPASS\\_RATIO\\_TURBOFAN\\_AEROENGINE](https://www.researchgate.net/publication/306082636_PERFORMANCE_ANALYSIS_OF_HI_GH_BYPASS_RATIO_TURBOFAN_AEROENGINE)
22. Reaktyvinių variklių projektavimas. . [ Žiūrėta : 2018-02-20 ] Prieiga per internetą:  
<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19900019242.pdf>
23. Turboventiiaatorinis variklis. Konstrukciniai mazgai. . [ Žiūrėta : 2018-03-05 ] Prieiga per internetą: <https://www.flightglobal.com/pdfarchive/view/1954/1954%20-%200985.html>
24. Darbo procesai. Turboventiliatorinis variklis. . [ Žiūrėta : 2018-03-12 ] Prieiga per internetą:  
<https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/aturbf.html>
25. Konstrukcinių mazgų medžiagos. [ Žiūrėta : 2018-04-12 ] Prieiga per internetą:  
<https://www.aircraftmaterials.com/data/alstst/>
26. „GE“ turboventiliatorinis variklis. [ Žiūrėta : 2018-03-05 ] Prieiga per internetą:  
[https://web.stanford.edu/~cantwell/AA283\\_Course\\_Material/Engine\\_Data.pdf](https://web.stanford.edu/~cantwell/AA283_Course_Material/Engine_Data.pdf)
27. K.Lipskis, R.Lukošius, Z.Pocius. Molekulinė fizika ir termodinamika. Vilnius, 1979.