



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Automobilio vidaus degimo variklio turbokompresoriaus
parametrų tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Saulius Stanaitis
Projekto autorius

Doc. dr. Ramūnas Skvireckas
Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Automobilio vidaus degimo variklio turbokompresoriaus parametrų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Transporto priemonių inžinerija (kodas 6211EX021)

Saulius Stanaitis
Projekto autorius

Doc. dr. Ramūnas Skvireckas
Vadovas

Doc. dr. Darius Juodvalkis
Recenzentas

Kaunas, 2019



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino

(Fakultetas)

Saulius Stanaitis

(Studento vardas, pavardė)

Transporto priemonių inžinerija, 6211EX021

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Automobilio vidaus degimo variklio turbokompresoriaus parametrų tyrimas“

AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Sauliaus Stanaičio**, baigiamasis projektas tema „Automobilio vidaus degimo variklio turbokompresoriaus parametrų tyrimas“ 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 – Transporto priemonių inžinerija 6211EX021

Magistrantūros studijų baigiamojo projekto užduotis

Studentui(-ei) *Sauliui Stanaičiui*

1. Baigiamojo projekto tema:

„Automobilio vidaus degimo variklio turbokompresoriaus parametrų tyrimas“

„Research of Turbocharger Parameters of Car's Internal Combustion Engine“

2. Projekto tikslas:

Ištirti lengvojo automobilio vidaus degimo variklio turbokompresoriaus konstrukcinių parametrų įtaką automobilio jėginėms charakteristikoms.

3. Projekto uždaviniai:

1. Išanalizuoti turbokompresoriaus konstrukciją, veikimo principus ir išsiaiškinti pagrindinius jo trūkumus.
2. Atlikti analitinius automobilio su vidaus degimo varikliu turbokompresoriaus konstrukcinių parametrų įtakos variklio jėginėms charakteristikoms skaičiavimus;
3. Sudaryti skaitinį automobilio turbokompresoriaus konstrukcijos modelį bei atlikti skaitinius parametrų įtakos tyrimus.
4. Praktiškai patikrinti lengvojo automobilio turbokompresoriaus konstrukcinių parametrų įtaką variklio jėginėms charakteristikoms.

4. Projekto aprašomosios dalies struktūra:

Darbą sudaro įvadas, 1,2 ir 3 skyriai, išvados, naudotos literatūros sąrašas, priedai. Darbo apimtis – 51 puslapis, jame yra 2 lentelės, 40 paveikslų. Bibliografinį sąrašą sudaro 41 šaltinis.

5. Projekto konsultantai:

Baigiamojo projekto autorius	<u>Saulius Stanaitis</u>	<u>2017.11.02</u>
	<i>(vardas, pavardė, parašas, data)</i>	
Baigiamojo projekto vadovas	<u>Ramūnas Skvireckas</u>	<u>2017.11.02</u>
	<i>(vardas, pavardė, parašas, data)</i>	
Krypties studijų programos vadovas	<u>Janina Jablonskytė</u>	<u>2017.11.02</u>
	<i>(vardas, pavardė, parašas, data)</i>	

Saulius Stanaitis. Automobilio vidaus degimo variklio turbokompresoriaus parametrų tyrimas. Magistro krypties studijų baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Ramūnas Skvireckas; Kauno technologijos universitetas, mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypties grupė): Transporto inžinerija (E12), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: *turbokompresoriaus parametrų tyrimas, ribotuvas, sukimo momentas, galia.*

Kaunas, 2019. 51 p.

Santrauka

Tobulėjant transporto priemonėms sugalvota įvairių būdų kaip padidinti variklio galingumą nedidinant variklio darbinio tūrio. Vienas paprasčiausių būdų – įmontuoti turbokompresorių. Turbokompresorius – tai turbina, varoma išmetamųjų dujų, kuri velenu sujungta su kompresoriumi, kuris pumpuoja orą į variklį.

Šio darbo **tyrimo objektas** yra lengvojo automobilio turbokompresorius, naudojamas standartiniuose bei sportiniuose automobiliuose.

Tyrimo tikslas Ištirti lengvojo automobilio vidaus degimo variklio turbokompresoriaus konstrukcinių parametrų įtaką automobilio jėginėms charakteristikoms. Tikslui pasiekti kelti šie uždaviniai: išanalizuoti turbokompresoriaus konstrukciją, veikimo principus ir išsiaiškinti pagrindinius jo trūkumus; atlikti analitinius automobilio su vidaus degimo varikliu turbokompresoriaus konstrukcinių parametrų įtakos variklio jėginėms charakteristikoms skaičiavimus; sudaryti skaitinį automobilio turbokompresoriaus konstrukcijos modelį bei atlikti skaitinius parametrų įtakos tyrimus; praktiškai patikrinti lengvojo automobilio turbokompresoriaus konstrukcinių parametrų įtaką variklio jėginėms charakteristikoms.

Darbe naudota metodika – mokslinės, teisinės literatūros analizė, sisteminimas ir apibendrinimas, variklio galios ir sukimo momento matavimai, naudojant galios nustatymo stendą.

Šiame darbe buvo tiriama į turbokompresorių patenkančio oro kiekio įtaka variklio galiai ir sukimo momentui. Atlikus tyrimą gautos pagrindinės išvados, kad variklio su 34 mm skersmens ribotuvu parametrai yra geresni už variklio su 33 mm skersmens ribotuvu. Ribotuvo skersmenį padidinus vienu milimetru padidėja variklio galia bei sukimo momentas. Matematiniai skaičiavimai parodė, kad skirtumas yra 32 proc. Praktinių matavimų duomenys skiriasi 7 proc. Simuliacija „SolidWorks“ programinio paketo pagalba parodė, kad oro srauto greitis taip pat yra didesnis naudojant 34 mm skersmens ribotuvą.

Stanaitis, Saulius. Research of car internal combustion engine turbocharger's parameters / Master's Final Degree Project / supervisor assoc. dr. Ramūnas Skvireckas; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Transport Engineering (E12), Engineering science.

Keywords: turbocharger parameters test, restrictor, torque, power

Kaunas, 2019. 51 pages.

Summary

Various ways to increase engine power without increasing engine capacity are related with cars development. One of the easiest way to do that is to put a turbocharger on a car. The turbocharger is turbine – driven forced induction device that increases an internal combustion engine's efficiency and power output by forcing extra compressed air into the combustion chamber.

The main object of the research of the thesis is a turbocharger used in standard and sports cars.

The aim of the research is to investigate the influence of the turbocharger of the internal combustion engine to a car power characteristics. Objectives of the thesis are: to describe the construction, operation and management of the turbocharger; analyze the main failures; to perform analytical calculations of the influence of the structural parameters of the turbocharger to engine power characteristics; to make a digital model of the turbocharger construction and to perform analysis of the influence of parameters; test in practice the influence of the car's turbocharger construction parameters on the engine power characteristics.

The methodology used in the work is the analysis, systematization and legislation of scientific literature, measurements of engine power and torque using a power bench.

In this work, the influence of the amount of air entering the turbocharger on the engine power and torque was investigated. The main conclusions of the work were that the motor with a 34 mm diameter limiter is better than the 33 mm diameter limiter. Increasing the diameter of the stopper by one millimeter increases engine power and torque. Mathematical calculations showed that the difference is 32 percent. Practical measurements differ by 7 percent. Simulation with SolidWorks software package has shown that the airflow rate is also higher when using a 34 mm limiter.

Turinys

Paveikslų sąrašas	8
Lentelių sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Automobilio vidaus degimo variklio turbokompresoriaus analizė.....	12
1.1. Turbokompresoriaus istorija.....	12
1.2. Turbokompresoriaus veikimo principas, konstrukcija ir trūkumai	13
1.3. Turbokompresoriaus valdymas.....	16
1.3.1. Turbokompresoriaus slėgio reguliatoriai	16
1.3.2. Tarpinis oro aušintuvas.....	17
1.3.3. Viršslėgio vožtuvas BOV (<i>angl.</i> Blow Off Valve)	19
1.4. Turbokompresoriaus eksploatacija, dažniausiai pasitaikantys defektai ir gedimai	22
1.5. Turbokompresoriai ir aplinkosauga.....	27
2. Tyrimų metodika	29
2.1. Pasirinkto automobilio ir jame sumontuoto turbokompresoriaus aprašymas.....	29
2.2. Analitiniai pasirinktame automobilyje sumontuoto turbokompresoriaus skaičiavimai	32
2.2.1. Analitiniai pripūtimo parametrų skaičiavimai	34
2.2.2. Oro srauto simuliacija, pasinaudojus „SolidWorks“ programiniu paketu.....	39
2.3. Eksperimentinis pasirinkto automobilio turbokompresoriaus parametrų tyrimas.....	41
3. Rezultatų apibendrinimas ir palyginimas	46
Išvados	48
Literatūros sąrašas	49

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Turbokompresorius	12
1.2 pav. Turbokompresoriaus veikimo principas	14
1.3 pav. Turbokompresoriaus pjūvis	15
1.4 pav. Turbokompresoriaus apsauginių vožtuvų išdėstymas	17
1.5 pav. Turbokompresoriaus praleidimo vožtuvas	17
1.6 pav. Bendra turbokompresoriaus veikimo schema.....	18
1.7 pav. Tarpinis oro aušintuvas – „interkuleris“	19
1.8 pav. BOV‘o schema (vožtuvas uždarytas)	20
1.9 pav. BOV‘o schema (slėgis pašalinamas į atmosferą)	20
1.10 pav. BOV‘o schema (suspaustas oras recirkuliuojamas).....	20
1.11 pav. BOV vožtuvo veikimo padėtys.....	21
1.12 pav. Turbokompresoriaus veleno slydimo įvorė	24
1.13 pav. Turbokompresoriaus velenas	25
1.14 pav. Sudilęs turbokompresoriaus velenas.....	25
1.15 pav. Perkaitintas turbokompresoriaus velenas	25
1.16 pav. Išsilenkęs turbokompresoriaus velenas.....	25
1.17 pav. Turbinos sparnuotė su velenu	26
1.18 pav. Kompresoriaus sparnuotė	26
2.1 pav. „Mitsubishi Lancer EVO IX“ automobilis	29
2.2 pav. Ribotuvas (<i>angl.</i> restrictor)	30
2.3 pav. Turbinos ir ribotuvo montavimo schema.....	30
2.4 pav. Turbokompresoriaus plombavimo schema.....	31
2.5 pav. „Anti lag‘o“ veikimo schema	31
2.6 pav. „Mitsubishi Lancer EVO IX RS“ variklis	33
2.7 pav. „Mitsubishi Lancer EVO IX RS“ išmatavimai.....	33
2.8 pav. Turbokompresoriaus žymėjimas.....	34
2.9 pav. Kompresoriaus matmenys.....	35
2.10 pav. Ribotuvas	39
2.11 pav. Pratekantis oro srautas	39
2.12 pav. Oro srauto pokyčio grafikas.....	40
2.13 pav. Pratekantis oro srautas	40
2.14 pav. Oro srauto pokyčio grafikas.....	41
2.15 pav. Ritininis galios matavimo stendas	42
2.16 pav. Stebulinis galios matavimo stendas	42
2.17 pav. Stendo pajungimas prie automobilio stebulių.....	42
2.18 pav. Pūtimo ir ištraukimo ventiliatoriai	43
2.19 pav. „Mitsubishi Lancer EVO IX“ automobilis, prijungtas prie stendo.....	43
2.20 pav. Gauti natūrinių eksperimentų duomenys	44
2.21 pav. Sukimo momento kreivės	44
2.22 pav. Galios kreivės	45

Lentelių sąrašas

2.1 lentelė. „Mitsubishi Lancer EVO IX RS“ automobilio duomenys.....	33
3.1 lentelė. Tyrimo duomenys	46

Įvadas

Temos aktualumas. Variklio oro pripūtimo agregatas – tai įrenginys, kurio judančios (dažniausiai besisukančios) darbinės dalys, dirbant varikliui, padidina į cilindrus tiekiamo oro slėgį, o tuo pačiu ir jo kiekį.

Pirmas žmogus, kuriam kilo idėja pripūsti į cilindrus daugiau oro naudojant alkūninio veleno sukimosi energiją, buvo vokiečių inžinierius G. Daimleris[41]. Šveicaras A. Biuhi gavo patentą analogiškai oro pripūtimo sistemai, tik varomai deginių energija[41]. Tačiau išradėjų idėjos serijiniuose automobiliuose buvo įgyvendintos gerokai vėliau. Pirmas serijinis automobilis su mechaniniu oro pripūtimu išleistas 1921 metais ir tai buvo „Mercedes – Benz“[41].

Daugumoje variklių orą į cilindrus pučia turbokompresoriai. Toks oro pripūtimo agregatas užpatentuotas praėjusio amžiaus pradžioje, todėl, suprantama, jo konstrukcija gerokai pasikeitusi. Turbokompresoriai tobulinami nuolatos. Prieš keletą metų rinkoje pasirodė naujos kartos didžiausio turbokompresorių gamintojo „Garrett“ turbokompresoriai su keičiamos geometrijos turbinomis[41].

Variklio galią ir dinamiką dabar lemia ne jo darbinis tūris, bet oro, patenkančio į cilindrus, kiekis. Praktiškai visi naujai sukuriami varikliai komplektuojami su vienokiu ar kitokiu oro pripūtimo agregatu.

Kiekvienas oro pripūtimo agregatas turi tik jam būdingų specifinių eksploatacinių savybių, tačiau visi oro pripūtimo agregatai ne tik didina variklio galią, bet ir mažina degalų sąnaudas. Didesnis sukimo momentas ir didesnė variklio galia įgalina naudoti mažesnio perdavimo skaičiaus pavarų dėžes. Dėl to mažėja variklio alkūninio veleno sukimosi dažnis. Variklis su pripūtimo agregatu yra mažesnių gabaritų (mažesnio darbinio tūrio), todėl siurbimo ir trinties nuostoliai juose yra mažesni. Dėl mažesnių gabaritų mažesnė ir variklio masė. Taip pat mažesnė ir viso automobilio masė. Galiausiai pripūtimas padidina visą variklio naudingumo koeficientą.

Svarbiausias kiekvieno oro pripūtimo parametras – oro slėgio padidinimo laipsnis. Tai oro slėgių prieš ir po pripūtimo agregato santykis. Kuo agregato slėgio padidinimo laipsnis didesnis, tuo į cilindrus tiekiamas didesnis oro kiekis.

Baigiamojo projekto objektas: lengvojo automobilio turbokompresorius, naudojamas standartiniuose bei sportiniuose automobiliuose.

Baigiamojo projekto tikslas: Ištirti lengvojo automobilio vidaus degimo variklio turbokompresoriaus konstrukcinių parametų įtaką automobilio jėginėms charakteristikoms.

Uždaviniai:

1. Išanalizuoti turbokompresoriaus konstrukciją, veikimo principus ir išsiaiškinti pagrindinius jo trūkumus.
2. Atlikti analitinius automobilio su vidaus degimo varikliu turbokompresoriaus konstrukcinių parametų įtakos variklio jėginėms charakteristikoms skaičiavimus;
3. Sudaryti skaitinį automobilio turbokompresoriaus konstrukcijos modelį bei atlikti skaitinius parametų įtakos tyrimus.
4. Praktiškai patikrinti lengvojo automobilio turbokompresoriaus konstrukcinių parametų įtaką variklio jėginėms charakteristikoms.

Darbo metodai ir priemonės:

- **teoriniai:** teorinės, mokslinės, publicistinės literatūros analizė, sisteminimas ir apibendrinimas;
- **praktiniai:** variklio galios ir sukimo momento matavimai, naudojant galios nustatymo stendą, rezultatų analizė ir palyginimas.

Baigiamojo projekto struktūra: Darbą sudaro įvadas, 1,2 ir 3 skyriai, išvados, naudotos literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 51 puslapis, jame yra 2 lentelės, 40 paveikslų. Bibliografinį sąrašą sudaro 41 šaltinis.

1. AUTOMOBILIO VIDAUS DEGIMO VARIKLIO TURBOKOMPRESORIAUS ANALIZĖ

1.1. Turbokompresoriaus istorija

Nuo vidaus degimo variklio sukūrimo variklių konstruktoriai ieškojo būdų, kaip padidinti variklio galią. Buvo sukurta ir išbandyta daug įvairių būdų tam pasiekti: degalų tobulinimas, įsiurbimo ir išmetimo fazių tobulinimas, degimo kameros tobulinimas ir kt.

Vienas paprasčiausių ir efektyviausių būdų padidinti variklio galią – sudaryti slėgį įsiurbimo trakte. Tam reikia agregato (kompresoriaus), kuris pripūstų į variklį oro. Technologai, konstruktoriai sugalvojo įvairių tipų kompresorių: G – formos, sraigtinių, stūmoklinių, Comprex tipo ir kt.[41]. Dalis jų nepasiteisino dėl mažo patikimumo, sudėtingumo ar žemo efektyvumo, dalis naudojami iki šiol. Kiekvienas kompresorius, sukeldamas slėgį, naudoja energiją, mažindamas variklio galią ir variklio naudingumo koeficientą [10].

Kiekvienas vidaus degimo variklis dalį nepanaudotos energijos, tokios kaip šiluma, išmetamųjų dujų inercijos jėga, išmeta į išmetimo sistemą, o iš jos į orą. Ši energija geriausiu atveju būna naudojama aplinkai šildyti. Įvertinęs tai, šveicaras A. Buchi 1925 m. įmontavo į išmetimo sistemą dujų turbiną, kuri per ašį suko kompresorių. Šis kompresorius buvo pavadintas turbokompresoriumi (žr.1.1 pav.)[10].



1.1 pav. Turbokompresorius [6]

Turbokompresoriaus montavimas vidaus degimo varikliuose populiarėjo po truputį, nes dėl didelės kainos daugelis transporto priemonių gamintojų nesiryždavo to daryti. Pažengus gamybos technologijoms, t. y. sumažėjus turbokompresoriaus gamybos kaštams ir padidėjus jų patikimumui, apie 1980 m. įvyko lūžis – turbokompresorius imta naudoti vis dažniau.

Pagrindinė turbokompresoriaus problema, kurią daug metų bando išspręsti turbokompresorių gamintojai – tai „turbo duobė“. Kadangi turbokompresoriaus ašis su rotoriais turi masę, tai atitinkamai turi ir inerciją. Tai pagrindinė priežastis, dėl kurios turbokompresorius įsisuka kiek vėliau, nei paspaudžiame akseleratoriaus pedalą. Nuo 1990 m. prasidėjo turbokompresorių rotorių ir ašies masės mažinimo bumas. Turbokompresoriai buvo smarkiai patobulinti ir jau praktiškai išstūmė paprastus kompresorius iš rinkos [1, 15].

1998 m. automobilių rinkoje buvo pradėti naudoti turbokompresoriai su keičiamu, turbinos rotorių sukančių dujų srautu. Taip prasidėjo naujas etapas turbokompresorių istorijoje, ženkliai pagerinęs variklių su turbo įpūtimu dinamiką ir kitus parametrus.

Jau anksčiau buvo bandomi turbokompresoriai su keičiamu sukančių dujų srautu, tačiau bandymai neduodavo rezultatų. Turbokompresorių gamintojas „Garrett“ sukūrė kintamos geometrijos turbokompresorių VNT (*angl.* Variable Nozzle Turbine – keičiamos geometrijos turbokompresorius) lengviesiems automobiliams, kuris pirmiausia buvo įmontuotas į VW-Audi grupės automobilius. Norėdami neatsilikti, kiti gamintojai – „Holset“, „KKK“ – pradėjo galvoti apie naujoves. „Holset“ sukūrė naują VGT (*angl.* Variable Geometry Turbine – kintamos geometrijos turbokompresorius) turbinų seriją. Jie pirmiausia buvo sumontuoti „Iveco“ sunkvežimiuose su „Cursor“ varikliais. „KKK“ gamintojui nebeliko nieko kito, kaip sukurti ką nors, kas būtų neužpatentuota. Sukūrus kintamos geometrijos turbiną ir pradėjus ją gaminti, „Garrett“ padavė juos į teismą už kopijavimą. „Garrett“ prisiėmė 30 mln. eurų, „KKK“ kintamos geometrijos turbinų gamyba buvo nutraukta [10].

Šiuo metu išmetamųjų dujų srautą turbinoje valdo automobilio kompiuteris, taip užtikrindamas nepriekaištingą tikslumą ir patikimumą. Šiuolaikinis dyzelinis variklis be turbokompresoriaus apskritai sunkiai įsivaizduojamas.

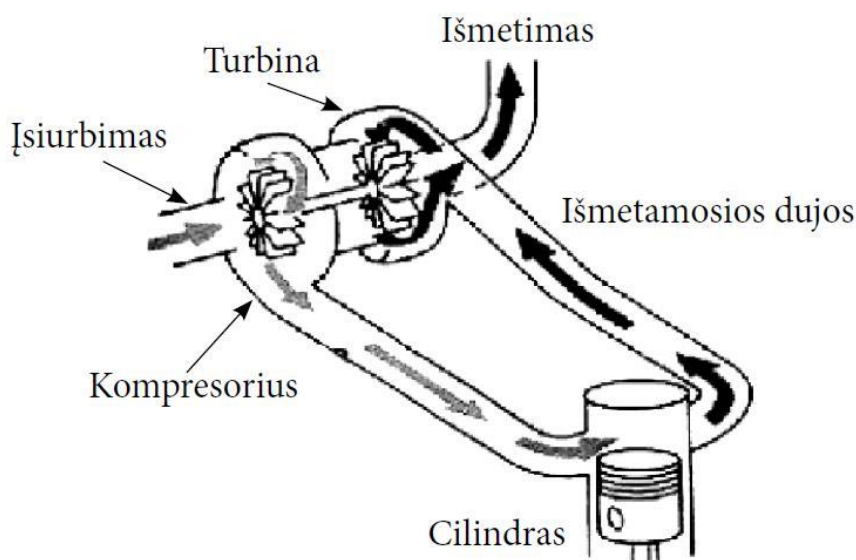
1.2. Turbokompresoriaus veikimo principas, konstrukcija ir trūkumai

Turbokompresoriaus veikimo principas susijęs su vienu iš fizikos dėsnių – idealių dujų dėsniu, kurio esmė yra tokia: dujų temperatūra, slėgis ir tūris yra tarpusavyje susiję. Suspaudus dujas (sumažinus jų tūrį) ir temperatūra pakils. Leidus dujoms plėstis, ir dujų temperatūra bei slėgis sumažės. Padidinus dujų temperatūrą, padidės dujų slėgis (uždaroje erdvėje) arba tūris (jei dujoms leidžiama plėstis). Pagaliau dujos teka iš didesnio slėgio zonos į žemesnio slėgio zoną. Kuo didesnis slėgių skirtumas, tuo didesne jėga dujos veržiasi į žemesnio slėgio zoną [10].

Keturaktis variklis atlieka darbą plečiantis dujoms uždaroje erdvėje, kai didelis dujų slėgis spaudžia stūmoklį. Dujos degimo metu įkaista, todėl gaunami dar didesni slėgiai, o tuo pačiu ir didesnis galingumas. Tačiau didžioji šilumos dalis išmetama lauk į išmetimo vamzdį dar prieš ją panaudojant. Nors šiluma – tai energija, išmetama šiluma nepanaudojama, nes cilindras yra per trumpas, kad visą šilumą paversti mechanine energija. Nėra praktiška gaminti cilindrų pakankamai ilgus, kad iš besiplečiančių dujų išspausti visą energiją. Vienas iš problemos sprendimo būdų galėtų būti nukreipti išmetimo vamzdį priešinga judėjimui kryptimi ir pabandyti gauti šiek tiek reaktyvinės traukos, bet, išskyrus labai retus atvejus, dujų kiekis nepakankamas gauti nors kiek naudingą postūmį. Keletas senesnių automobilių modelių tokiu būdu tikrai sukurdavo šiek tiek didesnę trauką, bet to nepakanka, kad būtų reali nauda. Taigi, geriausia galimybė yra prie išmetamųjų dujų srauto prijungti papildomą mechanizmą – turbiną.

Turbokompresorius (*angl.* turbocharger) – tai yra turbina, varoma išmetamųjų dujų, kuri velenų sujungta su kompresoriumi, kuris pumpuoja orą į variklį [15]. Didesnis oro kiekis cilindre reiškia, kad daugiau degalų galima sudeginti viename variklio cikle. Daugiau sudegusių degalų reikiama daugiau išmetamųjų dujų, daugiau išmetamųjų dujų reiškia didesnę galią ir išsiplėtimą.

Dažnai klystama, kad išmetamųjų dujų turbiną varo tik kinetinė dujų energija, kai dujos atsitrenkia į turbinos sparnelius. Išmetimo dujų srauto kinetinė energija tikrai prisideda prie turbinos darbo, tačiau didžioji išgaunamos energijos dalis ateina iš kitur. Aukšta temperatūra, didelis slėgis ir mažas tūris yra didelės energijos būsenos, o žema temperatūra, mažas slėgis ir didelis tūris yra mažos energijos būsenos. Išmetimo dujų banga išeina iš cilindro būdama aukštos temperatūros ir slėgio. Banga susijungia su išmetimo bangomis iš kitų cilindrų, ir patenka į turbinos įėjimą, kuriame nedaug vietos. Šiame taške yra labai didelis slėgis ir temperatūra, taigi dujos turi daug energijos. Kai pro difuzorių dujos patenka į turbinos vidų, iš mažos ertmės jos patenka į didelę. Atitinkamai dujos plečiasi, vėsta, krenta jų greitis ir visą energiją jos atiduoda turbinos sparneliams. Sparneliai turbinos viduje įmontuoti taip, kad besiplečiančios dujos slėgtų turbinos sparnelius ir verstų ją sukintis. Taip gaunama energija iš išmetimo dujų šilumos, kuri šiaip būtų buvusi prarasta (1.2 pav.).

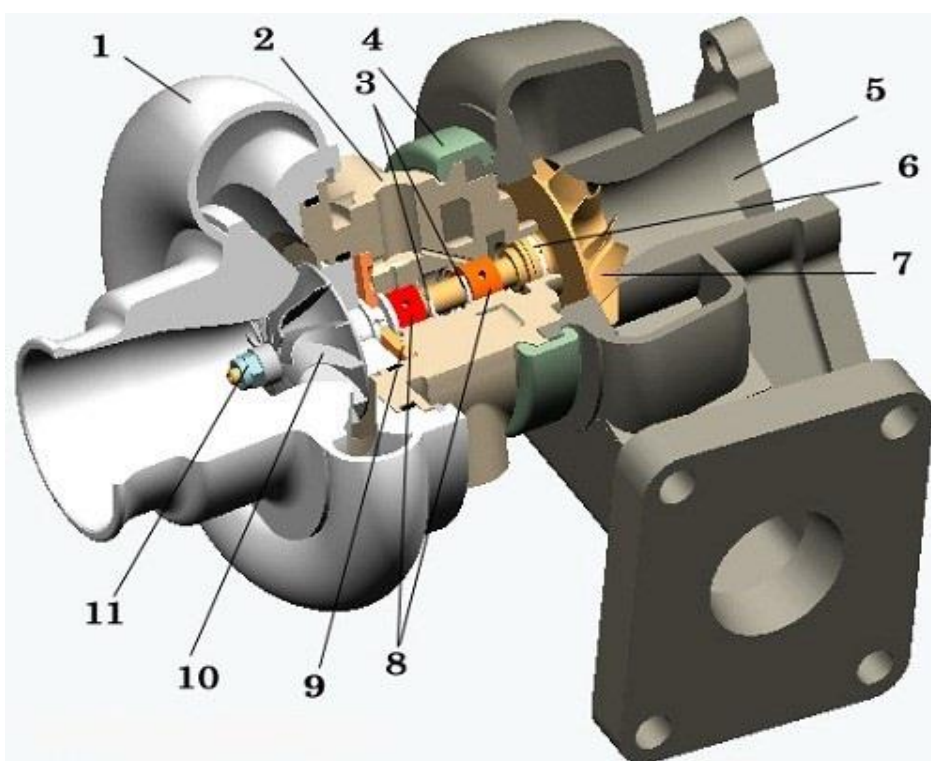


1.2 pav. Turbokompresoriaus veikimo principas [6]

Kadangi galima išgauti darbą iš besiplečiančių turbinoje dujų, taip pat sėkmingai galima suspausti dujas, sukant turbinos veleną išorinio galios šaltinio pagalba. Kitaip tariant, kompresorius – tai atvirkščiai veikianti turbina. Veikia tie patys fizikos dėsniai, tik kita kryptimi: imame žemo slėgio dujas, atliekame su jomis darbą, jas suspausdami kompresoriaus sparneliais, ir gauname didelio slėgio ir aukštos temperatūros dujas kompresoriaus išėjime. Dėl atlikto darbo su oru pastarasis įkaista. Tai blogai. Aukštos temperatūros dujos turi mažesnę tankį. Be to, padidėja detonacijos tikimybė. Detonacija atsiranda dėl spaudžiamo oro kylančios temperatūros. Spaudžiamo oro temperatūra gali pakilti tiek, kad oro ir degalų mišinys, patekęs į cilindrą, gali susprogti anksčiau, negu uždegimo žvakės turėtų jį uždegti. Detonacijos pasekmės varikliui gali būti labai skaudžios. Taigi oras turi būti atvėsintas, neprarandant slėgio. Tam yra naudojamas tarpinis oro aušintuvas [2,11,15].

Nors turbinos ir kompresoriaus dalys iš esmės tokios pačios, jos nėra visiškai vienodos dėl procesų, vykstančių degimo metu. Duotas oro tūris yra pakankamas sudeginti tam tikrą tiksliai apibrėžtą degalų kiekį. Oro santykis su degalais yra maždaug 14:1. Išmetimo dujų kiekis daug didesnis už oro kiekį, sunaudotą degimo metu, ir išmetimo dujų slėgis daug didesnis, negu paduodamo oro, todėl veleno ir turbinos vidaus konstrukcija labai skiriasi [2].

Pačią paprasčiausią „turbo“ sistemą sudaro šie elementai: turbokompresorius, įpučiamo oro slėgio reguliatorius ir kartais naudojamas tarpinis oro aušintuvas (*angl.* „intercooler“). Turbina dažniausiai tvirtinama prie įsiurbimo kolektoriaus arba sujungiama su juo specialiomis aukšto slėgio žarnomis. Turbokompresoriaus pagrindinis elementas – išcentrinis oro siurblys („šaltoji sparnuotė“) montuojamas ant to paties veleno, kaip ir dujų turbina. Pastarąją suka išmetamųjų variklio dujų srautas, sukdamas ant to paties veleno sumontuotas menteles („karštoji sparnuotė“). Veleno atramosė yra riedėjimo arba slydimo guoliai (1.3 pav.). Pastarieji naudojami dažniau, nes juose esantis tepalas užtikrina slydimą ir papildomai aušina turbiną. Išmetamosios dujos gali įsukti turbiną iki 50–200 tūkst. aps./min., priklausomai nuo turbinos konstrukcijos ir veikimo režimo [3, 13].



1.3 pav. Turbokompresoriaus pjūvis [20]. 1. Kompresoriaus sraigė; 2. Turbinos korpusas; 3. Žiedai; 4. Sudūrimo žiedas; 5. Turbinos sraigė; 6. Sandarinimo žiedai; 7. Turbinos sparnuotė; 8. Slydimo guoliai; 9. Atraminiai slydimo guoliai; 10. Kompresoriaus sparnuotė; 11. Veržlė

Pagrindiniai turbo kompresorinio variklio trūkumai – pavėluota turbokompresoriaus reakcija į akceleratoriaus paspaudimą „turbo duobė“ (*angl.* *turbo lag*), dėl rotoriaus inertiškumo taip pat mažas pripūtimo slėgis prie žemų variklio sūkių. Šiuos trūkumus turbokompresorių gamintojai bando sumažinti gamindami kuo mažesnę ir greitesnę turbokompresorių, slėgio ribotuvą, taip pat kintamos geometrijos turbiną. Šiuolaikinių turbokompresorių lengviesiems automobiliams ir mikroautobusams sūkliai siekia 150 000 aps./min., pripūtimo slėgis 2,8 bar ir daugiau.

Turbininio variklio charakteristikos tiesiogiai priklauso nuo turbinos sukuriamo slėgio: kuo daugiau oro pavyksta įpūsti į cilindrus, tuo galingesnis yra variklis. Važinėjant tam tikru režimu, turbo kompresoriniai varikliai turi ir daugiau privalumų – sumažėja degalų sąnaudos, automobilis geriau važiuoja kalnuose, kur paprasti varikliai tiesiog „dūsta“ nuo išretėjusio oro, ir t.t.

Norint serijiniame variklyje sumontuoti galingą, aukšto slėgio turbiną arba perprogramuojant variklio valdymo bloką, visų pirma tenka sustiprinti praktiškai visas pagrindines detales – pradedant stūmokliais (patariama naudoti kaltinius ir su papildomu alyvos aušinimu) ir baigiant specialiais tarpikliais ir įsiurbimo bei išmetimo kolektoriais. Be to, naudojant aukšto slėgio turbinas, susidaro vadinamosios „turbo duobės“, t. y. galios stoka, kai variklio sūkių yra maži, ir staigus galios šuolis, kai turbina pasiekia aukštų sūkių diapazoną.

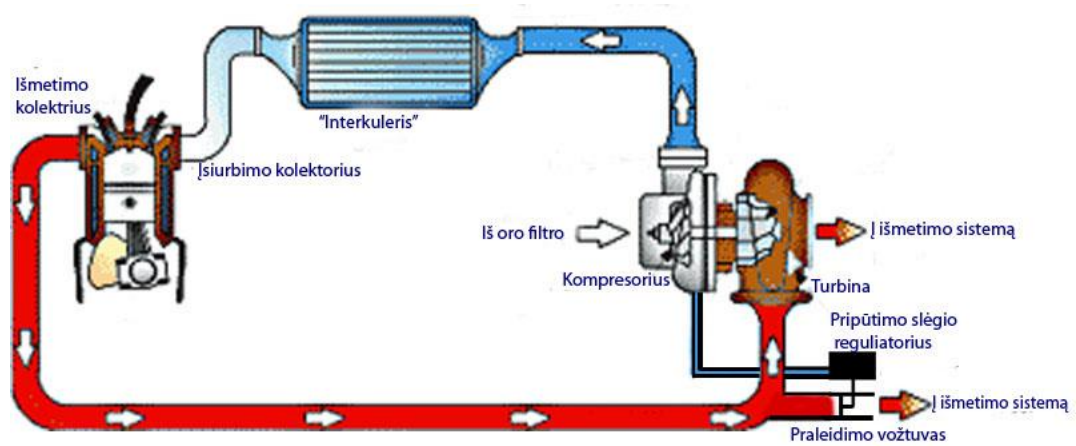
Intensyviai spręsti šią problemą konstruktoriai ėmėsi maždaug prieš du dešimtmečius. Jie pradėjo naudoti specialius mažos trinties turbinos veleno guolius, optimizuotus kolektorius, daugiavožtuvines variklių galvutes ir t.t., o į didelio darbo tūrio variklius inžinieriai pasiūlė montuoti dvi mažesnės galios turbinas („Audi RS6“, „Maybach 62“). Pasirodė, kad efektyviausiai išlyginti variklio trauką gali oro slėgio reguliatoriai.

Visi variklių turbokompresoriniai mechanizmai pagal įpučiamo oro slėgį skirstomi į dvi grupes: žemo slėgio (0,2-0,8 bar) ir aukšto slėgio (0,8-2 bar). Pirmiesiems, kaip parodė praktika, slėgio reguliatoriai yra visiškai nebūtini. Pvz., „Saab 9-5“ modelio 3,0 l darbo tūrio V6 „Ecopower Turbo“ variklyje sumontuota palyginti negalinga, kartu ir mažiau „galvojanti“, turbina „Garrett“. Tam, kad pasiektų maksimalų 0,25 bar slėgį, ji panaudoja tik 3 cilindrų išmetamąsias dujas iš 6. Todėl, net esant aukštesniems variklio sūkiams, turbina negali smarkiai įsibėgėti ir sukurti didelio įpučiamo oro slėgio. Tokioje turbinoje elektronikos valdoma sklendė atsidaro nedelsiant, vos tik smarkiau paspaudžiamas akceleratoriaus pedalas. Taigi turbina akimirksniu gauna jai reikalingą išmetamųjų dujų kiekį ir įpučia į cilindrus reikalingą oro kiekį. Kai tik oro siurblys įsisuka iki reikiamo sūkių diapazono, sklendė sugrįžta į padėtį, atitinkančią nustatytą variklio sūkių kiekį. Aukšto slėgio turbinose reikalingi oro slėgio reguliatoriai [14,15].

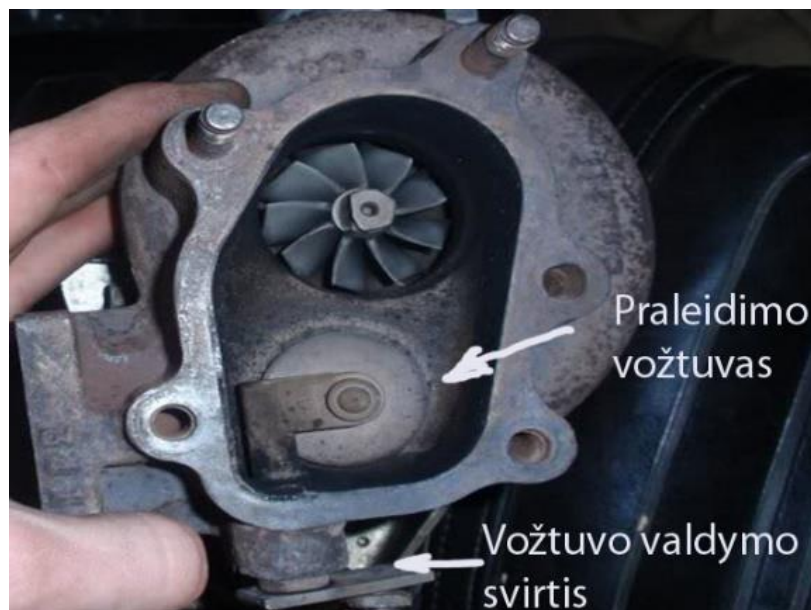
1.3. Turbokompresoriaus valdymas

1.3.1. Turbokompresoriaus slėgio reguliatoriai

Dažniausiai oro slėgio reguliavimui turbinose naudojami apsauginiai vožtuvai, vadinami „Wastegate“ (išmetamųjų dujų sklendė) arba tiesiog „veistgeitu“ (1.4, 1.5 pav.). „Veistgeitas“ yra paprasčiausias vožtuvas, kuris atsidaro pasiekus tam tikrą oro slėgį (*angl.* boost level) ir praleidžia išmetimo dujas aplink turbiną vietoje to, kad leisti dujoms eiti per turbiną [15]. Tokiu būdu sumažinamas slėgių skirtumas tarp turbinos įėjimo ir išėjimo, todėl mažiau atliekama darbo, todėl turbinos sukimasis sulėtėja. „Veistgeitai“ gali būti valdomi ir mechaniškai, ir elektronikos. Pirmuoju atveju vožtuvą atidaro pertekliniu slėgiu pučiamas oras, antruoju – elektroniškai valdomas elektromagnetas. Komandą „atidaryti vožtuvą“ duoda variklio elektroninis valdymo blokas, remdamasis iš keleto jutiklių – oro slėgio įsiurbimo kolektoriuje, detonacijos, oro masės matuoklės ir kt. – gaunama informacija [9, 15].



1.4 pav. Turbokompresoriaus apsauginių vožtuvų išdėstymas [19]



1.5 pav. Turbokompresoriaus praleidimo vožtuvas [19]

Vienintelė subtilybė yra tame, kad „veistgeitui“ turi užtekti pajėgumo praleisti visą dujų perteklių. Jei ne, turėsime tolesnį lėtą oro slėgimo ir variklio galios didėjimą turbokompresoriaus darbo metu [15].

1.3.2. Tarpinis oro aušintuvas

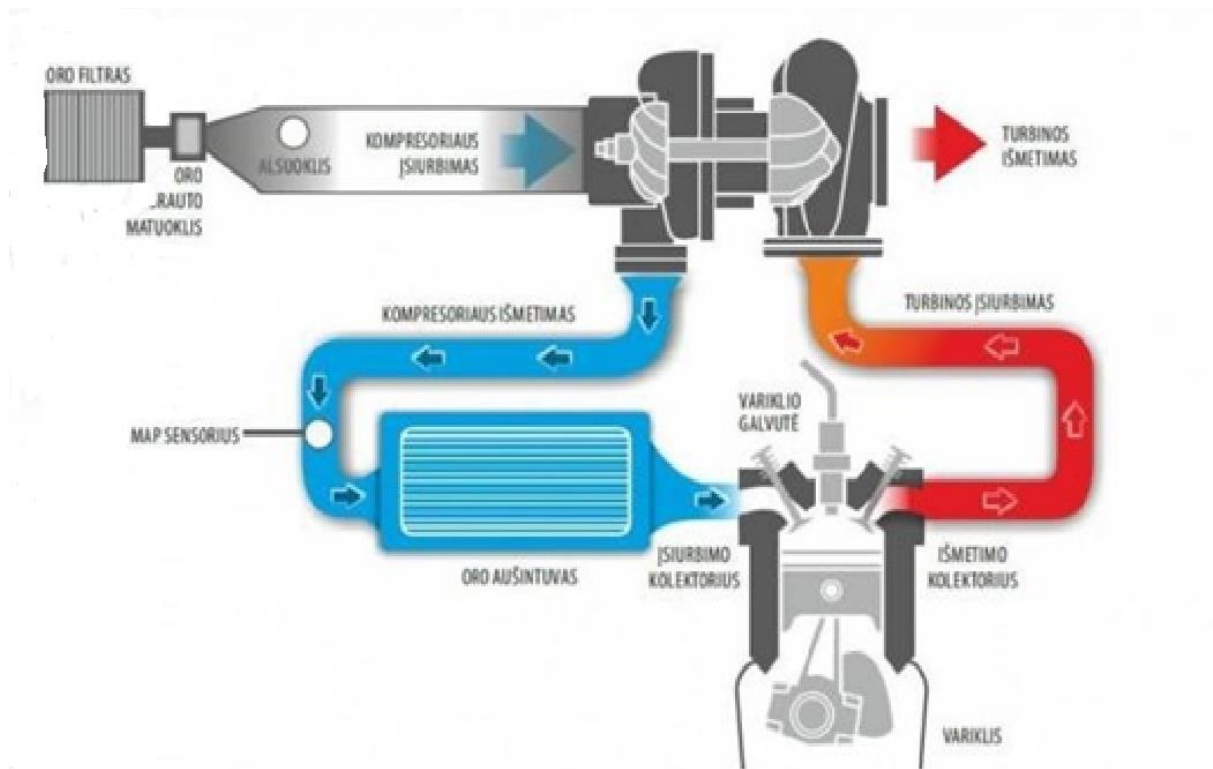
Tarpinis suslėgto oro aušintuvas (*angl.* intercooler) interkuleris. Tai radiatorius, kurio paskirtis – aušinti turbinoje suslėgtą orą prieš šiam patenkant į cilindrus, siekiant sumažinti detonacijos galimybę (1.6 pav.) [14]. Senesnieji varikliai su turbokompresoriumi jo neturi, tačiau šiuo metu jis montuojamas serijinėje įrangoje. Interkuleris paprastai būna šalia aušinimo skysčio radiatoriaus. Vienas jo galas prijungtas prie turbinos, kitas – į variklio maitinimo sistemą.

Interkulerio efektyvumas yra pakankamai aukštas – suspausto oro temperatūra sumažėja bent 50 proc. Jei turbina sukuria slėgį didesnę kaip 0,5 bar (8 psi), interkuleris yra labai rekomenduojamas.

Interkuleriai būna dviejų rūšių: oro/oro ir oro/vandens. Pirmojo tipo interkuleriai yra labiausiai paplitę. Jų veikimo principas jau minėtas – suspaustą orą aušina oro srautas iš lauko. Antrojo tipo

interkuleriai yra efektyvesni, bet sudėtingesni ir gerokai brangesni. Čia suspaustą orą aušina aušinimo skystis, kuris paskui savo ruožtu aušinamas oru [15, 16].

Interkulerį apibūdina du parametrai: efektyvumas ir slėgio kritimas. Efektyvumas nurodo, kiek sumažėja suspausto oro temperatūra (procentais). Pirmojo tipo interkulerių efektyvumas – 65-75 procentai, antrojo – gali siekti net 90 procentų [15].



1.6 pav. Bendra turbokompresoriaus veikimo schema [20]

Slėgio kritimas apibūdina įeinančio ir išeinančio oro slėgio pokytį. Geruose interkuleriuose šis parametras sudaro apie 0,07 bar (1psi), bet ne daugiau, kaip 0,2 bar (3 psi). Reiškia, kad jei turime variklį, kurio turbina sukuria 1 bar (15 psi) slėgį, tai be interkulerio tokio slėgio oras ir pateks į variklį. Su interkuleriu pateks tik 0,83-0,96 bar (12 - 14 psi). Be interkulerio variklis galbūt negalėtų priimti tų 12 psi dėl detonacijos pavojaus. Interkuleris padidina patikimumą. Jis pats nesukuria žymaus galios padidėjimo, tačiau leidžia turbina sukurti papildomą galią.

Be paties interkulerio labai svarbu ir vamzdžiai, kuriais įteka ir išteka suspaustas oras (1.7 pav.). Visa oro tiekimo sistema turi tilpti variklio skyriuje, turi būti kuo trumpesnė ir kuo mažiau sulankstyta, nes sulenkta vamzdžio dalis yra tolygi penkis kartus ilgesnei tiesaus vamzdžio atkarpai.



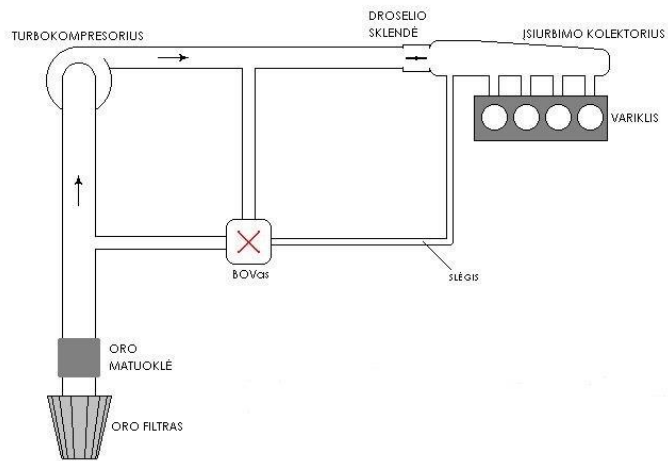
1.7 pav. Tarpinis oro aušintuvas - interkuleris [21]

Interkuleris yra viena svarbiausių visos turbokompresoriaus sistemos dalių.

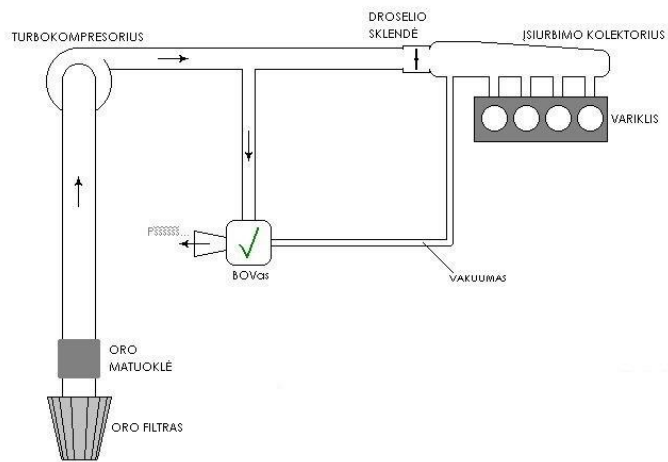
1.3.3. Viršslėgio vožtuvas BOV (*angl. Blow Off Valve*)

Viršslėgio vožtuvas (toliau – BOV) – tai turbinos slėgio numetimo vožtuvas. Tačiau BOV‘as – atlieka neigiamą darbą – jis paima taip brangiai suslėgtą orą ir išmeta jį lauk. Tačiau šis įtaisas yra būtinas, ir tenka su juo susitaikyti. Įsivaizduokime, kad automobilis greitėja, turbina pilnai įsisukusi, bet, staiga apsigalvojus, mes nukeliame koją nuo akseleratoriaus pedalo ir droselio sklendė užsidaro. Suspaustas oras, vietoje to, kad nuolatiniu srautu tekėtų į variklį, atsitrenkia į uždarytą sklendę. Turbina dėl savo inercijos toliau sukasi ir pumpuoja orą, ir oro, patekusio tarp turbinos ir droselio sklendės, slėgis greitai kyla. Tiksliau tariant, gaunama aukšto slėgio banga, kuri keliauja nuo droselio sklendės atgal į kompresorių ir trenkiasi į kompresoriaus sparnelius. Gaunamas panašus efektas kaip įkišus pagalį į dviračio stipiną. Nuo pasikartojančių smūgių kenčia kompresoriaus mentės ir veleno guoliai, be to sumažėja turbinos apsisukimai ir vėliau tenka gaišti laiką pakartotiniam jos įsukimui. BOV‘as montuojamas tarp kompresoriaus ir droselio sklendės (1.8 pav.). Jei BOV‘as pastebi smūgio bangą, išleidžia ją kur nors – atgal į atmosferą (1.9 pav.) arba į kompresoriaus įėjimą (1.10 pav.). Tokiu būdu mes prarandame slėgimą, bet išsaugome turbinos apsisukimus [10, 15].

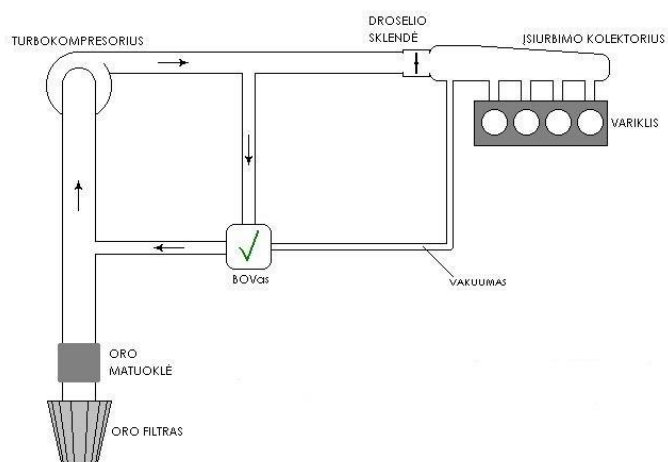
BOV‘o valdymo vamzdelis yra sujungtas su įsiurbimo kolektoriumi ir užtikrina tai, kad kolektoriuje susidarius vakuumui BOV‘as būtų atidaromas. Tai esminė BOV‘o savybė, kuri leidžia numesti (ar sugrąžinti atgal prieš turbiną) perteklinį orą (1.8, 1.9, 1.10 ,1.11 pav.).



1.8 pav. BOV'o schema (vožtuvas uždarytas) [22]



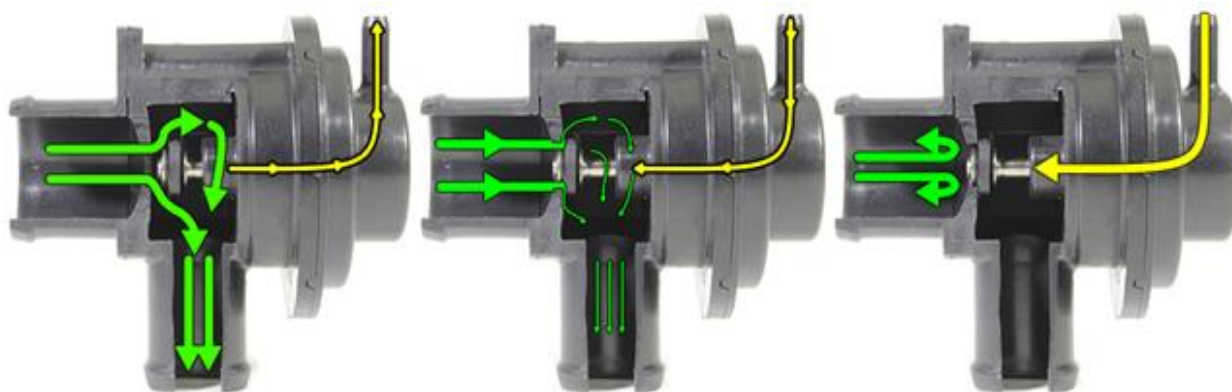
1.9 pav. BOV'o schema (slėgis pašalinamas į atmosferą) [22]



1.10 pav. BOV'o schema (suspaustas oras recirkuliuojamas) [22]

Tačiau BOV'as turi ir didelį trūkumą (1.11 pav.) – varikliui dirbant laisvomis apsukomis, įsiurbimo kolektoriuje susidaro pakankamai žymus vakuumas (~0.5-0.7bar), kuris atidaro vožtuvą. Recirkuliacinio BOV'o atveju tai nesudaro problemų, nes abu BOV'o galai (tiek įėjimas, tiek išėjimas) yra pajungti į oro tiekimo sistemą. Kai BOV'o išėjimas yra atvertas į atmosferą, dirbantis laisvomis apsukomis variklis ima siurbti per jį aplinkinį orą (nes per jį siurbti gerokai lengviau nei per visa oro tiekimo sistemą – t. y. interkulerį, turbiną, oro filtrą ir t.t.). Taip į variklį patenka oras, kuris yra, viena vertus, nešvarus (nes nepraėjęs per oro filtrą), kita vertus, jis nėra išmatuotas oro srauto matuoklės. Variklio valdymo kompiuteris „mano“, kad į variklį patenka žymiai mažiau oro nei kad jo patenka iš tikrųjų, dėl ko stipriai nuliesėja degalų mišinys, laisvoji eiga tampa labai netolygi ar variklis netgi gesta [41].

Firminiuose atmosferiniuose BOV'uose ši problema paprastai sprendžiama padarant reguliuojamo įtempimo spyruoklę – t. y. yra galimybė BOV'o vožtuvą sureguliuoti taip, kad jis neatsidarytų esant tokiam vakuumui, kuris yra varikliui dirbant laisvomis apsukomis. Tačiau iš to išplaukia trūkumas – taip sureguliuotas BOV'as neatsidarinės, kai yra atleidžiamas akseleratoriaus pedalas, jei tuo metu slėgis nebus pakankamai didelis tam, kad įveikti spyruoklės pasipriešinimą. O ir atsidarant jo atsidarinėjimas bus vangesnis, o išmetamo lauk oro kiekis bus mažesnis nei kad BOV'e su mažesnio įtempimo spyruokle [10].



1.11 pav. BOV'o vožtuvo veikimo padėtys [22]

Tačiau egzistuoja keletas būdų kurie leidžia standartinį recirkuliacinį BOV vožtuvą atverti į atmosferą ir/arba naudoti BOV'ą su mažesnio įtempimo spyruokle.

Pirmas būdas, kurį pasiūlė knygos „21st Century Performance“ autorius bei vienas iš elektroninio automobilių modifikavimo žurnalo „Autospeed“ kūrėjų J. Edgaras, yra panaudoti adatinį vožtuvą (populiariai vadinamą bleed'erį - *angl.* bleed valve). Tam puikiausiai tinka pigiai kainuojantis akvariuminis „burbulatorius“, kurį galima nusipirkti bet kurioje zoologijos prekių parduotuvėje. Paprastai adatiniai vožtuvai namudiniame automobilių „tuninge“ yra naudojami tam, kad pakelti turbino sukuriamą slėgį apgaunant perteklinių išmetamųjų dujų nuleidimo vožtuvo („wastegate“) aktyvatorių. Tuo tikslu šio vožtuvo pagalba yra nuleidžiama į atmosferą dalis suspausto oro iš valdymo žarnelės, einančios į aktyvatorių [27].

Darbe aptariamam atveju, vožtuvo panaudojimas yra analogiškas – jei esant 0,5-0,7 bar vakuumui BOV'as būna atsidaręs reikia tiesiog susilpninti į jį iš įsiurbimo kolektoriaus ateinantį signalą. Tam ir panaudojamas adatinis vožtuvas.

Šio metodo minusas yra analogiškas kaip ir didelio įtempimo spyruoklės naudojimo – dėl susilpnėjusio signalo BOV'as bus mažiau jautrus. Šio trūkumo neturi kiti išvardinti būdai.

Antrasis būdas, taip pat pasiūlytas J. Edgare, yra pats sudėtingiausias, bet ir pats tobuliausias. Speciali sistema atidaro elektromagnetinį vožtuvą (taip vadinamą „solenoidą“ (*angl.* solenoid valve) – jie naudojami automobiliuose turbinos slėgio valdymui, taip pat automobilinėse dujų sistemose), kuris yra įterptas į BOV'o valdymo žarnelę tik tada, kai yra reikalinga išleisti lauk perteklinį suspaustą orą – tai yra, kai yra staigiai atleidžiamas akseleratoriaus pedalas. Tam panaudojamas specialus elektroninis prietaisas – droselio sklendės padėties atsidarinėjimo taimeris (*angl.* delta throttle timer (DTT)), kuris pastoviai stebi droselio sklendės padėties jutiklio parodymus ir nustatęs, kad droselio sklendė staigiai užsidarė pasiunčia signalą į „solenoidą“ [27].

Papildomai dar yra naudojamas nedidelis vienpusis vožtuvas (t. y. vožtuvas kuris praleidžia dujas (ar skystį) tik į vieną pusę – tokie vožtuvai naudojami pvz. automobilių stabdžių stiprintuvų sistemose ar akvariumų oro tiekimo sistemose), kuris aplenkia „solenoidą“ tuo atveju kai įsiurbimo kolektoriuje (taigi ir valdymo vamzdyje) yra slėgis. Tai padeda išlaikyti BOV'ą uždaru, tuo metu kai variklis dirba (taigi ir turbokompresorius pučia) pilnu pajėgumu.

Paskutinė smulki, bet reikalinga sistemos detalė – tai nedidelė skylutė žarnelėje tarp BOV'o ir „solenoido“. Jei šios skylutės nebūtų, galėtų susidaryti situacija, kai užsidarius „solenoidui“, vamzdyje tarp pastarojo ir BOV'o lieka vakuumas, dėl ko BOV'as užstringa atviroje būsenoje.

Trečiasis siūlomas būdas iš pirmo žvilgsnio kiek panašėja į antrąjį aptartą būdą, tačiau funkciniu požiūriu veikimas yra visiškai skirtingas. Čia taip pat yra naudojamas „solenoidas“, tačiau jis valdomas kitaip. Yra naudojamas specialus jungiklis, kuris įjungia elektros grandinę pasiekus tam tikrą slėgį (paprastai šis slėgis yra reguliuojamas gana plačiose ribose - pvz. nuo 0,3 iki 10 barų).

Ketvirtasis būdas kardinaliai skiriasi nuo kitų trijų būdų. Jei kituose būduose stengiamasi kažkokių būdu įtakoti BOV'o valdymo signalą tam, kad pasiekti norimą tikslą, tai šiuo atveju BOV'o valdymas ignoruojamas.

Problema sprendžiama iš esmės – jei nenorima, kad per BOV'ą būtų siurbiamas oras, tai reikia užkirsti tam kelią. Šiuo tikslu panaudojamas didelis vienpusis vožtuvas, kuris leidžia pertekliniam orui išeiti per BOV'ą, tačiau neleidžia jo įsiurbti. Šis vožtuvas gali būtų sumontuotas tiek prieš BOV'ą tiek ir už jo, atsižvelgiant į poreikius [10, 11, 15].

1.4. Turbokompresoriaus eksploatacija, dažniausiai pasitaikantys defektai ir gedimai

Kaip ir kiti automobilio mechanizmai, taip ir turbokompresoriai nėra amžini – jie genda, o jų remontas kainuoja nemažus pinigus. Ką reikia daryti, kad ši variklio dalis tarnautų ilgiau?

Pirma reikia nepamiršti tikrinti automobilio variklio alyvos lygio, stebėti, kad jis nebūtų žemiau leistinos ribos, be to, pačią alyvą (alyvos filtrą taip pat) reikėtų keisti reguliariai, kad turbokompresorius visuomet gautų geriausią tepimą. Rekomenduojama nemaišyti skirtingų gamintojų alyvų ir jas keisti kas 10-15 tūkst. kilometrų, net ir tais atvejais, kai alyva skirta ilgam naudojimui (pavyzdžiui, 30 000 km), taip pat nenaudoti pigių alyvos filtrų, o rinktis tik žinomų gamintojų produkciją.

Kitas svarbus faktorius – geras oro filtras. Jį taip pat reikėtų pastoviai tikrinti, kad nebūtų užsikimšęs ir leistų turbino kompresoriui per jį lengvai siurbti šviežią orą. Renkantis oro filtrą rekomenduojama netaupyti lėšų, nes būna atvejų, kai sušlapę pigūs filtrai tampa kaip popieriniai ir laikui bėgant lūžta, o atplyšusios dalys patenka į kompresorių. Patariama oro filtrą keisti du kartus per metus: pavasarį ir rudenį. Išmetimo sistemą prižiūrėti irgi būtina. Ji privalo būti neužsikimšusi.

Taip pat, esant šaltam varikliui, reikėtų vengti stiprių akceleratoriaus paspaudimų. O baigus kelionę, ypač po važiavimo aukštomis apsukomis ar esant karštam varikliui, būtina, prieš jį užgesinant, leisti apie porą minučių padirbti laisva eiga, kad turbokompresorius atvėstų ir baigtų greitą sukimašį.

Vairuotojams, kurie važiuoja ramiai, kartas nuo karto rekomenduojama „pramankštinti“ turbokompresorių stipresniais akceleratoriaus paspaudimais. Ilgalakis ramus važinėjimas kenkia turbokompresoriui, todėl, kad sutrinka jo geometrijos darbas, nes suodžiai užsilieka turbokompresoriuje, jie nėra pilnai išmetami ir viskas nusėda ant sienelių. Pagrindinis tokio defekto simptomas yra traukos dingimas važiuojant į kalną ar dideliu greičiu. Tuomet įsijungia serviso režimas. Užgesinus variklį, strigimas dingsta ir vėl galima važiuoti. Tačiau važinėti taip nerekomenduojama. Būtina nedelsiant automobilį nuvežti specialistams.

Svarbų vaidmenį turbokompresoriaus darbe vaidina išmetimo sistema, o labiausiai katalizatorius. Katalizatoriaus paskirtis – mažinti išmetamųjų dujų kenksmingumą. 1979 metais Japonija ir JAV pirmosios pradėjo rūpintis, kad būtų naudojami katalizatoriai, nes jie neutralizuoja pagrindinius teršalus. Dabar katalizatorius yra neatsiejama automobilio dalis. Daugelyje šalių katalizatoriai yra privalomi. Dauguma modernių automobilių turi trijų dalių katalizatorius. Kiekviena iš šių dalių redukuoja po vieną išmetamųjų dujų komponentą: anglies monoksidą, angliavandenilius ir azoto oksidus.

Katalizatoriai būna dviejų rūšių: redukciniai ir oksidaciniai. Abiejų rūšių aktyvioji medžiaga yra keraminė, padengta kelių atomų storio katalizinių savybių turinčio metalo (platinos, rodžio ar paladžio) sluoksniu. Šiuolaikiniuose katalizatoriuose veikia cheminės kontrolės sistema, katalizatoriaus korpuse montuojamas vadinamasis lambda zondas. Jis matuoja deguonies kiekį išmetamosiose dujose. Duomenys iš zondo siunčiami į elektroninį variklio valdymo bloką. Pagal gautus duomenis jis reguliuoja degiojo mišinio degalų ir oro santykį – kad geriau sudegtų degalai.

Katalizatorius gerai atlieka savo darbą, kol automobilis nuvažiuoja apie 100-150 tūkstančių kilometrų. Vėliau katalizatorius turi būti keičiamas.

Dar vienas neigiamas aspektas – esant katalizatoriui sumažėja automobilio galia, 3–5 proc. padidėja degalų sąnaudos.

Labai svarbu laiku sureaguoti į kiekvieną gedimą, susijusį su oro, maitinimo, išmetimo ar tepimo sistemomis, kurių darnus darbas užtikrina nepriekaištingą turbokompresoriaus veikimą [1, 15, 28].

Turbokompresorius turi dvi sparnuotes, kurios gali būti pažeistos. Taip pat išdyla ašis, jungianti šias abi sparnuotes. Neilgaamžiai yra ir slydimo guoliai bei pats turbokompresoriaus korpusas, kuris retai, bet gali skilti.

Gerai veikiantis turbokompresorius mus informuoja, kad automobilio variklis ir jo mazgai taip pat veikia sklandžiai. Sugedus turbina, reikia ieškoti gedimo ir variklio sistemoje. Akivaizdu, jog šiuos gedimus galima identifikuoti anksčiau, taip užkertant kelią turbokompresoriaus sugadinimui. Ir laiku

pastebėjus bei pašalinus kitų variklio sistemos mazgų gedimus, gali neprireikti turbokompresoriaus remonto.

Susirūpinti reiktų tuomet, kai padidėja variklio alyvos sąnaudos arba ji sunkiasi pro turbiną, sklinda neįprasti pašaliniai garsai iš turbokompresoriaus, sumažėja ar visai dingsta variklio galia, padidėja degalų sąnaudos ar iš išmetimo sistemos veržiasi melsvi arba juodi dūmai. Taip pat neturi būti jokio pašalinio turbokompresoriaus skleidžiamo garso.

Paskutiniu metu į naujus automobilius vis dažniau montuojami turbokompresoriai, kurių pagrindinė paskirtis ne tik variklio galios didinimas, bet ir ekonomiškumas bei taršos mažinimas. Todėl turbokompresoriai automobiliuose tampa vis svarbesne dalimi.

Gamintojai jau ilgą laiką į automobilius montuoja ne tik vieną, bet ir du turbokompresorius, kurie užtikrina dar didesnę variklio galią arba tolygų jos palaikymą visuose sūkių diapazonuose. Turbokompresorių technologija vis labiau tobulėja, o automobilių gamintojai pradeda montuoti jau net ir tris turbokompresorius [12, 15] .

Turbokompresorių galima būtų vadinti patikimu agregatu, tačiau pagrindiniai jo veikimą stabdantys veiksniai yra:

- variklinė alyva,
- oras,
- valdymas,
- variklio svetimkūniai[15].

Turbokompresoriaus gedimo priežastys yra šios:

1. Nešvarumais (abrazyvais) užteršta alyva – sukelia gilius įbrėžimus ir įtrūkimus (kietos metalo atplaišos) turbokompresoriaus veleno slydimo įvorėje (1.12 pav.), tuo tarpu guoliavietė pažeidžiama šiek tiek mažiau. Velenas ir korpuso vidus pagaminti iš stipresnio metalo, todėl juos pažeisti sunkiau.



1.12 pav. Turbokompresoriaus veleno slydimo įvorė [31]

2. Chemiškai užteršta alyva, praradusi tepimo savybes, stipriai išdilina turbokompresoriaus veleną (1.13 pav.) ir slydimo guolius, juos perkaitina. Dažniausiai tai sukelia į alyvą patekę degalai, aušinimo skystis, kuris sumažina alyvos tepimo savybes.



1.13 pav. Turbokompresoriaus velenas [31]

3. Sumažėjusio alyvos padavimo į turbiną priežastimi dažniausiai būna atplyšusi alyvos nubėgimo tarpinė arba naudojamas hermetikas, kuris dalinai ar visai užkiša alyvos siurblio paėmimo ar padavimo vamzdelį į turbokompresorių. Gedimas lengvai atpažįstamas iš perkaitusių ir spalvą pakeitusių veleno guoliaviečių (1.14 pav.). Kaip priežastį galima įvardinti ir visišką alyvos nebuvimą, kuris per trumpą laiką sukelia didelius ir rimtus gedimus.



1.14 pav. Sudilęs turbokompresoriaus velenas [31]

4. Dėl didelės temperatūros ties slydimo guoliais ant veleno kaklelio atsiranda alyvos nuodegų ir kokso (1.15 pav.).



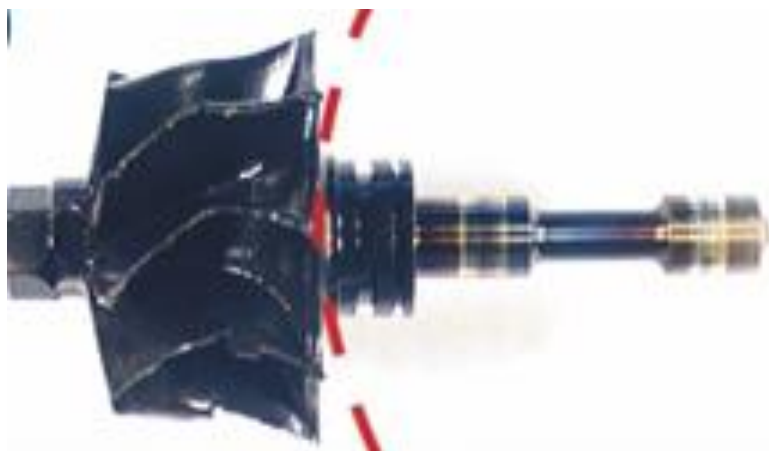
1.15 pav. Perkaitintas turbokompresoriaus velenas [31]

5. Užkišta išmetimo sistema. Išsilenkusi nuo karščio galinė veleno dalis (1.16 pav.), susidaręs spaudimas išmetimo sistemoje išdaužo atraminį guolį ir guoliavietės. Turbina praleidžia alyvą.



1.16 pav. Išsilenkęs turbokompresoriaus velenas [31]

6. Persisukimas. Pažeidžiami veleno sparneliai, kurie nuo per didelių apkrovų tiesiog atitrūksta. Gedimo priežastys panašios į sukeltas pašalinių objektų, bet skiriasi matomais įtrūkiams veleno paviršiuje (1.17 pav.). Retais atvejais, dėl per didelių sūkių, veleno galvutė gali lūžti perpus. Esant didesnėms nei leistina apkrovoms įtrūkimai plečiasi ir galiausiai sukelia staigų veleno lūžimą.



1.17 pav. Turbinos sparnuotė su velenu [31]

7. Pašaliniai objektai įsiurbimo sistemoje. Svetimkūniai, tokie kaip medžiagos atplaišos ar popierinės servetėlės, patekusios per įsiurbimo sistemą į kompresorių, sukelia sparnuotės pažeidimą (1.18 pav.). Paprastai mentelės išlinksta.



1.18 pav. Kompresoriaus sparnuotė [31]

Turbokompresoriaus remontas pirmiausia prasideda nuo variklio techninės būklės įvertinimo ir jo mechaninės apžiūros. Po to apžiūrima turbina: tiek iš išorės, tiek iš vidaus. Šiuolaikiniuose varikliuose viskas susiję, todėl turbinos gedimo priežastis gali būti tiek turbokompresoriuje, tiek pačiame variklyje.

Jei gedimo priežastis yra kompresoriuje, remontas bus paprastesnis ir pigesnis, nes turbokompresorius pagamintas iš tokio metalo (aliuminio, ketaus ir plieno), kuris, laikantis visų technologinių reikalavimų, remontuojamas tikrai patikimai. Šiandien praktiškai įmanomas bet kurios turbokompresoriaus dalies keitimas. Todėl šį pakankamai brangų automobilio mazgą galima pilnai suremontuoti. Ir jei variklis yra tvarkingas, turbokompresorius tarnaus ilgiau nei pastarasis [10, 12, 15].

1.5. Turbokompresoriai ir aplinkosauga

Automobilių ir jų komponentų gamintojai mano, kad benzininiams varikliams pritaikyta turbininė technologija yra puiki priemonė sumažinti į aplinką išmetamą anglies dvideginio kiekį. Naudodami turbinas, gamintojai pirkėjams gali pasiūlyti mažesnio darbinio tūrio, ekonomiškesnius variklius, kurie galingumu nenusileidžia daugeliui šiandien naudojamų jėgainių. Mažesni, taupesni ir lengvesni agregatai galėtų padėti įvykdyti savanorišką gamintojų įsipareigojimą Europos Sąjungai į aplinką išmetamo anglies dioksido kiekį sumažinti iki 140 g/km. 2003 m. šis rodiklis siekė 163 CO₂ g/km.

Daugelis mokslininkų mano, kad būtent dėl šiltnamio efektą sukeliančių CO₂ dujų vyksta visuotinis klimato atšilimas. Į aplinką išmetamo anglies dioksido kiekis yra tiesiogiai proporcingas automobilio degalų sąnaudoms.

Turbokompresorius yra išmetamųjų dujų varomas siurblys, kuris į cilindrus tiekia daugiau oro ir taip padidina variklio galingumą. Pagrindinis turbinos privalumas yra tai, kad ja galima padidinti mažų variklių galią, dėl to, vietoj didesnių įprastinių variklių gamintojai gali naudoti mažesnio darbinio tūrio turbininius agregatus. Be to, naudojant turbokompresorių, CO₂ tarša sumažėja 13 g/km. Už turbininių sistemų rinkodarą atsakingas „Honeywell Turbo Technologies“ vadovas O. Rabilleris mano, kad tai ir yra pagrindinė priežastis, dėl kurios išaugo gamintojų susidomėjimas benzininiais varikliais [23].

Turbokompresorius turi beveik visi Europoje parduodami dyzeliniai automobiliai, tačiau tarp benzininių agregatų turbininiai varikliai užima tik 8–10 proc. rinkos. Benzininiai turbininiai varikliai yra brangesni ir sudėtingesni už įprastinius, o pirkėjai kol kas dar pernelyg mažai žino apie šią technologiją.

Didžiausio Europos turbokompresorių gamintojo „BorgWarner Turbo Systems“ atstovas spaudai G. Kraemenas tvirtina, kad automobilių pramonė pripažino benzininių turbininių variklių privalumus ir aktyviai vysto jų technologijas[24].

Už benzininių variklių kūrimą atsakingas „Volkswagen“ inžinierius H. Middendorfas tikina, kad jau dabar turbokompresoriai montuojami maždaug į 50 proc. Vokietijoje parduodamų benzininių „Volkswagen“ ir „Audi“ automobilių. Anot gamintojo, 1,4 l agregatas su „Twincharger“ technologija yra galingesnis už 2,0 l įprastinį variklį, o jo kuro sąnaudos yra 5 proc. mažesnės [24].

BMW kartu su „PSA/Peugeot-Citroen“ kuria 1,6 l turbininį benzininį variklį. G. Kraemenas tvirtina, kad rinkoje vyrauja tendencija 2,2 l variklį keisti į 1,6 l turbininius agregatus. O. Rabilleris mano, kad ateityje galėtų pasirodyti ir dar mažesni 1,2 ir 1,5 l turbininiai varikliai [24].

Vis dėlto variklių darbinio tūrio mažinimas taip pat nėra beribis, nes benzininių variklių išmetamosios dujos yra karštesnės nei dyzelių ir kelia didesnę grėsmę agregato ilgaamžiškumui. Dyzelinių variklių išmetamųjų dujų temperatūra yra apie 750–850 su⁰ C, o benzininių variklių – daugiau nei 1000⁰ C.

G. Kraemenas teigia, kad ieškoma naujų medžiagų, kurios pasižymėtų aukštesne darbine temperatūra. Be to, komponentų gamintojai aiškinasi, ar naujiems turbininiams varikliams bus reikalingi žalingųjų dalelių filtrai bei azoto oksidų kiekį mažinantys katalizatoriai [10,14].

2007 metais Briuselyje buvo pasirašytas Europos Bendrijos strategijos dėl lengvųjų automobilių ir nedidelės galios prekybos transporto priemonių išmetamųjų CO₂ dujų mažinimo persvarstymo

komunikatas {SEC(2007) 60} {SEC(2007) 61}. Jame nubrėžti konkretūs tikslai dėl CO₂ kiekio mažinimo išmetamosiose dujose. 2009 metais išleidžiama Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2009/33/EB dėl skatinimo naudoti netaišias ir efektyviai energiją vartojančias kelių transporto priemonės [29].

2. TYRIMŲ METODIKA

Tiriamajame darbe, siekiant išsiaiškinti vidaus degimo variklio turbokompresoriaus konstrukcinių parametrų įtaką automobilio jėginėms charakteristikoms, numatyta atlikti turbokompresoriaus pratekančio oro ribotuvo parametrų tyrimus. Tyrimams atlikti bus naudojami analitiniai, skaitiniai ir natūriniai tyrimų metodai.

2.1. Pasirinkto automobilio ir jame sumontuoto turbokompresoriaus aprašymas

Automobilis „Mitsubishi Lancer Evolution“, kartais vadinamas tiesiog „Evo“, yra sportinė „Mitsubishi Lancer“ versija, gaminama „Mitsubishi Motors“ kompanijos (2.1 pav).



2.1 pav. „Mitsubishi Lancer EVO IX“ automobilis [20]

Išoriškai nuo standartinės versijos jis skiriasi buferiu, variklio dangčio forma ir aptaku. Iki šios dienos yra išleista dešimt automobilio modifikacijų, kurios yra žymimos romėniškais skaitmenimis. Visi automobiliai yra su 2,0 l darbinio tūrio turbininiais benziniais varikliais bei visų varančiųjų ratų sistema.

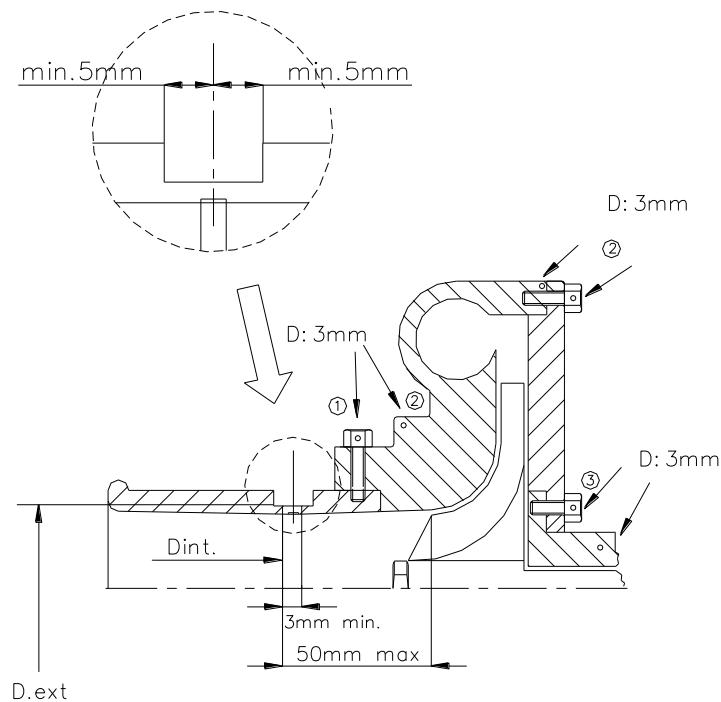
Tiriamajame projekte nagrinėjamas populiariausio automobilio „Mitsubishi Lancer EVO IX“ turbokompresoriaus pritaikymas automobilių sporte, remiantis Tarptautinės automobilių sporto federacijos (*angl.* FIA – International Automobile Federation) N4 grupės reikalavimais. Turbokompresorius ir standartiniam, ir sportui skirtame variante iš esmės niekuo nesiskiria. Sportui skirtas turbokompresorius TD05HRA-16G6mC-10.5T privalo turėti ribotuvą (*angl.* restrictor) (žr. 2.2 pav.), kuris tvirtinamas prieš kompresorių ir riboja į kompresorių patenkančio oro kiekį [17].



2.2 pav. Ribotuvas (*angl. restrictor*) [24]

Ribotuvo sumontavimą ir pagaminimą reglamentuoja FIA „J“ kodekso 254 straipsnis. Visi varikliai su turbokompresoriumi turi turėti ribotuvą, pritvirtintą prie kompresoriaus korpuso. Šis ribotuvas yra privalomas visose varžybose, kuriose dalyvauja N4 grupės automobiliai. Visas variklio darbui reikalingas oras privalo pereiti per ribotuvą, kuris turi atitikti šiuos reikalavimus:

1. Maksimalus vidinis ribotuvo skersmuo yra 33 mm, išlaikytas 3 mm atstumu iki sukimosi ašies, matuojant srauto tekėjimo kryptimi plokštumoje, statmenoje sukimosi ašiai, esančiai priešinga srautui kryptimi ne daugiau nei 50 mm nuo plokštumos, einančios per labiausiai priekyje esančius sparnuotės taškus (žr. 2.3 pav.). Priklausomai nuo varžybų, ribotuvo skersmuo gali būti kitoks.



2.3 pav. Turbinos ir ribotuvo montavimo schema [17]

2. Išorinis ribotuvo skersmuo žemiausiame jo taške turi būti mažesnis nei 39 mm ir turi būti išlaikytas 5 mm atstumas iš abiejų pusių.
3. Ribotuvo montavimas prie turbinos turi būti atliktas taip, kad norint nuimti ribotuvą nuo kompresoriaus, reiktų atsukti du arba tris kompresoriaus ribotuvo varžtus.
4. Prijungimas adatiniais sraigtais neleistinas.

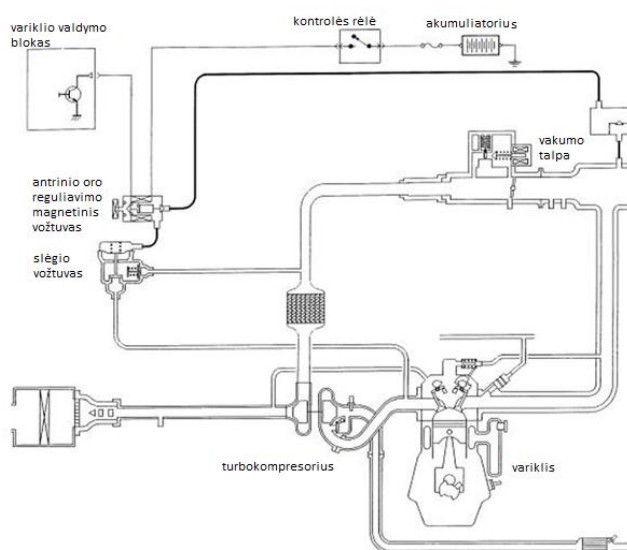
5. Ribotuvo montavimui leidžiama nuimti kompresoriaus korpuso medžiagą arba jos pridėti, turint vienintelį tikslą – sumontuoti ribotuvą prie kompresoriaus korpuso.
6. Varžtų galvutės turi būti pagamintos taip, kad varžtus būtų galima plombuoti.
7. Ribotuvas turi būti pagamintas iš vientisos medžiagos ir turi turėti kiaurymes, skirtas tik pritvirtinimui ir plombavimui, kuris atliekamas po tvirtinimo varžtais, po ribotuvu (arba ribotuvo/kompresoriaus korpuso sujungimas), kompresoriaus korpusu (arba korpuso / jungės prijungimas) ir turbinos korpusu (arba korpuso / jungės prijungimas) (žr. 2.4 pav.) [17].



2.4 pav. Turbokompresoriaus plombavimo schema [17]

Visas šis mazgas: ribotuvas, kompresorius, turbina ir kolektorius, per visas varžybas negali būti išardomi atskirai vienas nuo kito.

Sportiniuose automobiliuose ne tik privaloma įrengti ribotuvą, bet ir leidžiama koreguoti kai, kuriuos automobilio mazgus. Ypatingą svarbą turi turbo atsilikimo (*angl.* – *lago*) pašalinimas. Šis veiksmas vadinamas „anti lag“u“. „Anti lag“o“ veikimo schema parodyta 2.5 pav.



2.5 pav. „Anti lag“o“ veikimo schema [26]

Automobilių sporte naudojamų „anti-lag“ yra kelių rūšių, bet populiariausias yra tas, kuris sukuriamas naudojant variklio valdymo bloką. Tai jau ne standartinis automobilio variklio valdymo blokas. Jis, atleidus akceleratorių, pareguliuoja mišinio uždegimo kampą taip, kad degimo procesas vyksta ne tik degimo kameroje, bet ir išmetimo kolektoriuje. Sprogimo banga įsuka turbino sparnuotę, kuri perduoda sukimo momentą kompresoriui ir, kai vėl nuspaudžiamas akceleratorius, turbina būna pasiekus darbinę būseną. Tokiu būdu turbo atsilikimas, kuris atsiranda sumažėjus išmetamų dujų intensyvumui, pašalinamas.

Taip pat yra koreguojamas „vesgeito“ ir viršslėgio vožtuvų darbas. Tai daroma naudojant labai mažus vožtuvėlius, kurie yra įdedami guminėse žarnelėse tarp valdymo solenoido ir vakuuminių vožtuvų [12,17].

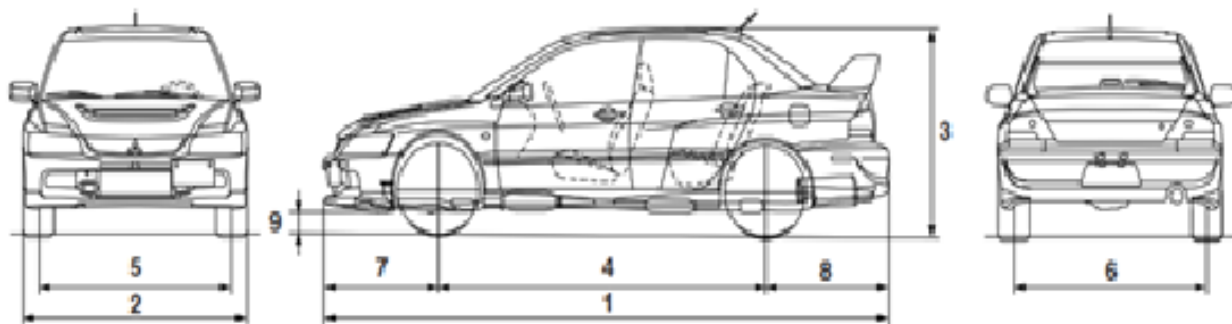
Standartiniame automobilyje „Mitsubishi Lancer EVO IX“ sumontuotas variklis su turbokompresoriumi išvysto 291 arklio galią esant 392 Nm sukimo momentui. Sumontavus ribotuvą ir atitinkamai pakoregavus variklio valdymo bloką galima išgauti ir 330 AG.

2.2. Analitiniai pasirinktame automobilyje sumontuoto turbokompresoriaus skaičiavimai

Pasirenkamas „Mitsubishi Lancer EVO IX RS“ automobilis. Šis modelis su nauju varikliu (2.6 pav.) buvo pristatytas 2005 metais. Kartu buvo pristatytas ir 2000 cm³ variklis 4G63T, su nauja MIVEC (*angl.* Mitsubishi Innovative Valve timing Electronic Control system) technologija ir atnaujintu turbokompresoriumi. MIVEC – tai nauja elektroninė dujų skirstymo mechanizmo ir vožtuvų valdymo sistema. Variklio galingumas padidėjo iki 280 AG (206 kW) ir įgavo geresnę dinamiškumą vidutinių sūkių diapazone.



2.6 pav. „Mitsubishi Lancer EVO IX RS“ Lancer variklis



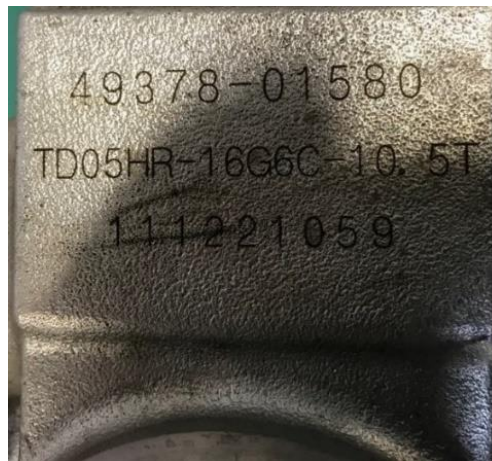
2.7 pav. „Mitsubishi Lancer EVO IX RS“ išmatavimai [27]

2.1 lentelėje pateikiami visi reikalingi šio modelio duomenys.

2.1 lentelė. „Mitsubishi Lancer EVO IX RS“ automobilio duomenys[27]

Detalizacija	Matavimo vienetas	Duomenys
Kėbulas		CT9A
Komplektacija		RS
Ilgis (1)(7 pav.)	mm	4535
Plotis(2) (7 pav.)	mm	1770
Aukštis(3) (7 pav.)	mm	1450
Ratų bazė(4) (7 pav.)	mm	2625
Atstumas tarp ratų (5,6) (7 pav.)	mm	1515
Klirinsas(9) (7 pav.)	mm	140
Pilna masė	kg	1900
Maksimalus greitis	km/h	250
Variklis		L4
Darbinis tūris	cm ³	1997
Galingumas	kW/aps. min	206/6500
Sukimo momentas	Nm/aps. min	400/3500
Cilindrų skaičius	vnt.	4
Vožtuvų skaičius cilindrai	vnt.	4
Alkūninio veleno eiga	mm	88
Stūmoklio diametras	mm	85
Suspaudimo laipsnis		10
Turbokompresoriaus markė		TD05HR – 16G6C – 10.5T
Turbokompresoriaus vidutinis efektyvus slėgis	bar/MPa	1,3/0,13

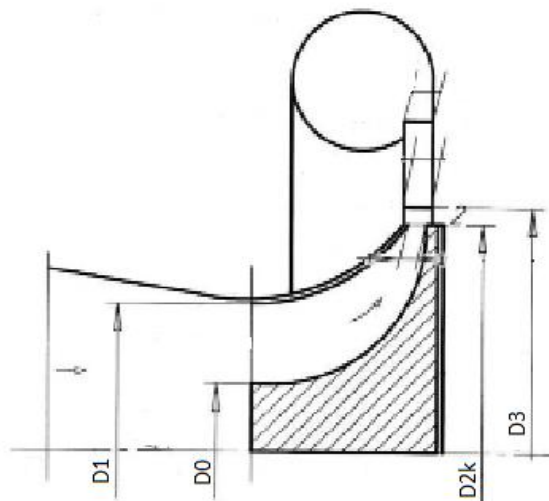
Pagrindiniai turbokompresoriaus TD05HR – 16G6C – 10.5T (2.8 pav.) duomenys



2.8 pav. Turbokompresoriaus žymėjimas

2.2.1. Analitiniai pripūtimo parametrų skaičiavimai

Daug šiuolaikinių benzininių variklių bei daugelis dyzelinių variklių yra aprūpinti išmetamųjų dujų turbokompresoriais. Tai leidžia padidinti automobilio variklio galią, esant tiems patiems gabaritams ir tuo pačiu sumažinti santykinę degalų sąnaudas. Kompresorius, įmontuotas išmetamųjų dujų turbokompresoriaus sistemoje, turi sukelti didesnę slėgį nei pripūtimo slėgis P_K , nes jo dalis yra išikvojama pasipriešinimui įveikti oro trakte tarp kompresoriaus ir variklio.



2.9 pav. Kompresoriaus matmenys [38]

1. Įėjimo į kompresorių vidinis skersmuo (ribotuvo skersmuo) $D_1 = 34$ mm (0,034 m)(2.9pav.).
2. Kompresoriaus sparnuotės vidinis skersmuo $D_0 = 13$ mm (0,013 m).
3. Kompresoriaus sparnuotės išorinis skersmuo $D_{2k} = 68$ mm.
4. Kompresoriaus sparnuotės mentelių skaičius 12 vnt.
5. Kompresoriaus vidinis skersmuo $D_3 = 135$ mm. (žr. 2.9 pav.)

34 mm ribotuvo skerspjūvio plotas randamas pagal formulę:

$$F_y = \frac{3,14 \cdot 0,034^2}{4} = 0,00091, \text{ m}^2$$

Apskaičiuojamas skerspjūvio plotas prieš sparnuotę [6]

$$F_{y \cdot k} = F_1 - F_0 \quad (1)$$

čia:

$$F_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \quad (2)$$

$$F_0 = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \quad (3)$$

čia $D_1 = 0,034$ m; $D_0 = 0,013$ m.

$$F_0 = \frac{3,14 \cdot 0,013^2}{4} = 0,00013, \text{ m}^2$$

$$F_1 = \frac{3,14 \cdot 0,034^2}{4} = 0,00091, \text{ m}^2$$

$$F_{y \cdot k} = 0,00091 - 0,00013 = 0,00078, \text{ m}^2$$

Daroma prielaida, kad $M_v = M_k$, kur M_k – oro kiekis patenkantis į kompresorių greičiu C_0 , slėgiu P_0 ir temperatūra T_0 . Dydis C_0 priklauso nuo ribotuvo skersmens ir viso reikalingo varikliui oro kiekio. Nustatę visa reikalingą varikliui oro kiekį, apskaičiuojame oro greitį ribotuvo viduje [20].

$$\rho_0 = \frac{P}{R \cdot T} \quad (4)$$

čia P – atmosferos slėgis, $P = 0,98 \cdot 10^5$ Pa; T – oro temperatūra prie įėjimo į kompresorių, $T = 293$ K (20° C); R – savitoji dujų konstanta, $R = 287$ J/kg K.

$$\rho_0 = \frac{0,98 \cdot 10^5}{287 \cdot 293} = 1,17 \text{ kg/m}^3 \approx 1,2$$

$$M_k = M_v = F_y \cdot C_0 \cdot \rho_0 \quad (5)$$

čia F_y – ribotuvo skerspjūvio plotas, $F_y = 0,00091, \text{ m}^2$; C_0 – oro greitis prie įėjimo į ribotuvą ($30 - 80$ m/s), $C_0 = 60$ m/s; ρ_0 – oro tankis prie 20° C, $\rho_0 = 1,2$ kg/m³.

$$M_k = 0,00091 \cdot 60 \cdot 1,2 = 0,066, \text{ kg/s}$$

Žinant pilną oro kiekį, apskaičiuojamas jo kiekis prieš sparnuotę [20].

$$M_k = 0,00078 \cdot 60 \cdot 1,2 = 0,056 \text{ kg/s}$$

Jeigu yra žinoma efektyvi galia, tai [6]

$$N_e = \frac{P_e \cdot V_h \cdot i \cdot n}{120} \quad (6)$$

čia V_h – cilindro darbinis tūris, $V_h = 0.499$ l; i – cilindrų skaičius, $i = 4$; n – alkūninio veleno sukimosi greitis, $n = 4000 \text{ min}^{-1}$ ($418,7 \text{ s}^{-1}$); P_e – vidutinis efektyvus slėgis, $P_e = 0,08 \text{ MPa} = 80000 \text{ Pa}$; N_e – efektyvi galia kai ribotuvas 34 mm yra 254 kW.

Apskaičiuojamas vidutinis efektyvus slėgis cilindre [20]

$$P_e = \frac{N_e \cdot 120}{V_h \cdot i \cdot n} \quad (7)$$

$$P_e = \frac{254 \cdot 120}{0,466 \cdot 4 \cdot 4000} = 4,09 \text{ MPa}$$

Oro slėgis išėjime iš kompresoriaus ir jo padidėjimas, apskaičiuojamas iš formulės [19].

$$p_k = (0,15 - 0,18)P_e \quad (8)$$

$$p_k = 0,18 \cdot 4,09 = 0,74 \text{ MPa}$$

Oro slėgis, išėjęs iš kameros, susiduria su įvairiais trukdžiais. Pirmoje eilėje yra tarpinis oro aušintuvas. Jis projektuojamas taip, kad jis žymiai sumažintų pripučiamo oro temperatūrą, bet, kad kuo mažiau turėtų įtakos slėgiui. Slėgio praradimo dydis oro aušintuve Δp_{0x} pagal statistinius duomenis [21]:

$$\Delta p_{0x} = (2 \div 6) \cdot 10^{-3}$$

čia Δp_{0x} - parenkamas $4 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}$.

Slėgis prieš cilindrą p'_k apskaičiuojamas pagal formulę [19]:

$$p'_k = p_k - \Delta p_{0x}, \quad (9)$$

čia p_k – turbinos sukiamas slėgis, MPa.

$$p'_k = 0,74 - 0,004 = 0,73 \text{ MPa}.$$

Apskaičiuojamas slėgio padidėjimo laipsnis turbinoje π_k [20]:

$$\pi_k = \frac{p'_k}{p_0}, \quad (10)$$

čia p_0 – atmosferos slėgis, $p_0 = 0,101 \text{ MPa}$.

$$\pi_k = \frac{p'_k}{p_0} = \frac{0,73}{0,101} = 7,23.$$

Slegiant orą turbinoje, agregatas įkaista, šios temperatūros dydis T_k^1 apskaičiuojamas pagal formulę [20]:

$$T_k^1 = T_0 \left(1 + \frac{\pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_a} \right) \quad (11)$$

čia k – oro adiabatės rodiklis, $k = 1,4$; η_a – adiabatinis kompresoriaus n.v.k, $\eta_a = (0,68 \div 0,76)$.
Parenkamas $\eta_a = 0,72$.

T_0 – oro temperatūra normaliomis sąlygomis, $T_0 = 293 \text{ K}$ (20° C).

$$T_k^1 = 293 \left(1 + \frac{7,23^{0,4} - 1}{0,72} \right) = 607 \text{ K}.$$

Skaičiuojama oro temperatūra prieš cilindrą T_k pagal formulę [20]:

$$T_k = T_k^1 - \sigma(T_k^1 - T_0), \quad (12)$$

čia σ – tarpinio oro aušintuvo šiluminis efektyvumas, $\sigma = (0,5 \div 0,9)$. Parenkama $\sigma = 0,9$.

$$T_k = 607 - 0,9 \cdot (607 - 293) = 324 \text{ K.}(51^\circ \text{ C})$$

Jei $\sigma = 0$, tai $T_k = T_k^1$, tai reiškia, jog nėra jokio tarpinio oro aušintuvo. Jeigu $\sigma = 0$, vadinasi, $T_k = T_0$, o tai reiškia, jog pripučiamas oras yra pilnai ataušinamas iki aplinkos temperatūros. Iš termodinaminės pusės dydį σ verta didinti, tačiau tuo pačiu didėja tarpinio oro aušintuvo gabaritai bei masė. Rekomenduojama pasirinkti aušintuvo efektyvumą šiose ribose $\sigma = (0,5 \div 0,9)$ [20].

Vidutiniojo efektyviojo dujų slėgio cilindre išmatuoti nėra galimybės. Tai – abstraktus parametras. Juo naudojasi, kai reikia palyginti variklius. Jis skaičiuojamas pagal formulę [17]:

$$p_e = p_k - p_m, \quad (13)$$

$$p_e = 0,74 - 0,207 = 0,533 \text{ MPa}.$$

Mechaninis naudingumo koeficientas rodo, kiek indikatorinės galios panaudojama naudingai, pavyzdžiui, mechanizmams varyti, ir kokie yra mechaniniai nuostoliai. Mechaninis naudingumo koeficientas skaičiuojamas pagal formulę [17]:

$$\eta_m = \frac{p_e}{p_k}, \quad (14)$$

čia p_e – vidutinis efektyvusis slėgis, MPa.

$$\eta_m = \frac{0,533}{0,74} = 0,72.$$

Variklio degimo kameros tūris apskaičiuojamas pagal formulę [20]:

$$V_c = \frac{V_h}{(\varepsilon_k - 1)}, \quad (15)$$

$$V_c = \frac{0,499}{(3,7 - 1)} = 0,185 \text{ l arba } \text{dm}^3.$$

Efektyvioji variklio galia skaičiuojama pagal šaltinio formulę [20]:

$$N_e = \frac{p_e i V_h n_N}{30\tau}, \quad (16)$$

čia i – cilindrų skaičius; V_h – vieno cilindro darbinis tūris, l.

$$N_e = \frac{5,33 \cdot 4 \cdot 0,499 \cdot 4000}{30 \cdot 4} = 354 \text{ kW}.$$

Efektyvusis sukimo momentas M_e apskaičiuojamas naudojantis patikslinta variklio galia N_e , esant nominaliems sūkiams. Efektyvusis sukimo momentas skaičiuojamas pagal formulę [20]:

$$M_e = \frac{9550 N_e}{n_N}, \quad (17)$$

čia n_N – alkūninio veleno sūčiai esant maksimaliai variklio galiai, min^{-1} .

$$M_e = \frac{9550 \cdot 354}{4000} = 845 \text{ Nm}.$$

Litrinė galia charakterizuoja variklio forsavimo laipsnį. Ji skaičiuojama pagal formulę [6]:

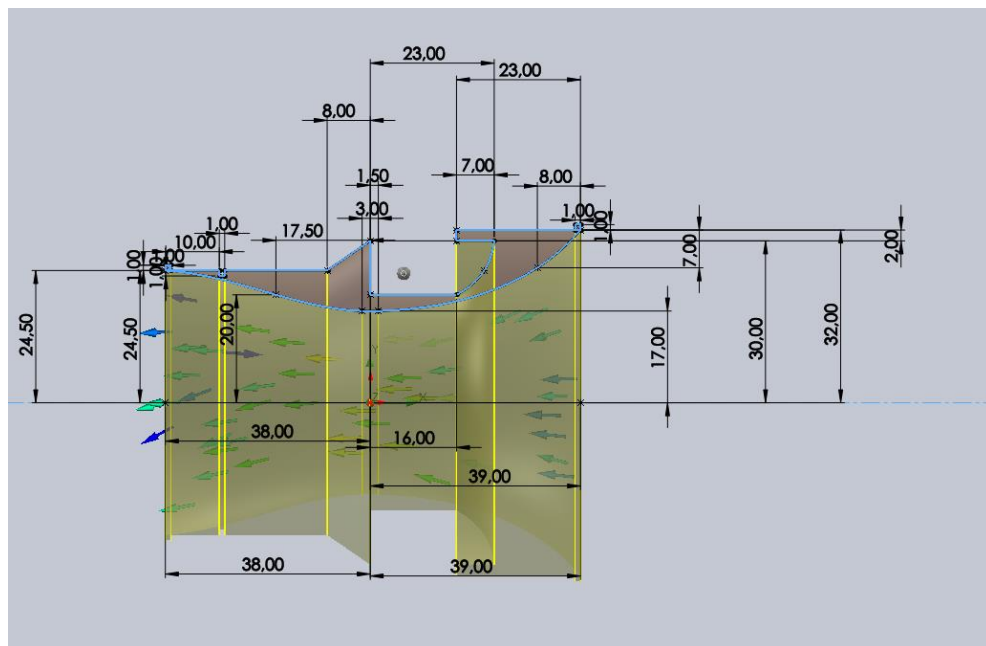
$$N_l = \frac{N_e}{i V_h}, \quad (18)$$

$$N_l = \frac{54}{4 \cdot 0,499} = 27 \text{ kW/l}.$$

Analogiškai apskaičiuojama ir 33 mm ribotuvo efektyvioji galia 241 kW, efektyvusis sukimo momentas 578 Nm ir litrinė galia 19 kW/l.

2.2.2. Oro srauto simuliacija, pasinaudojus „SolidWorks“ programiniu paketu

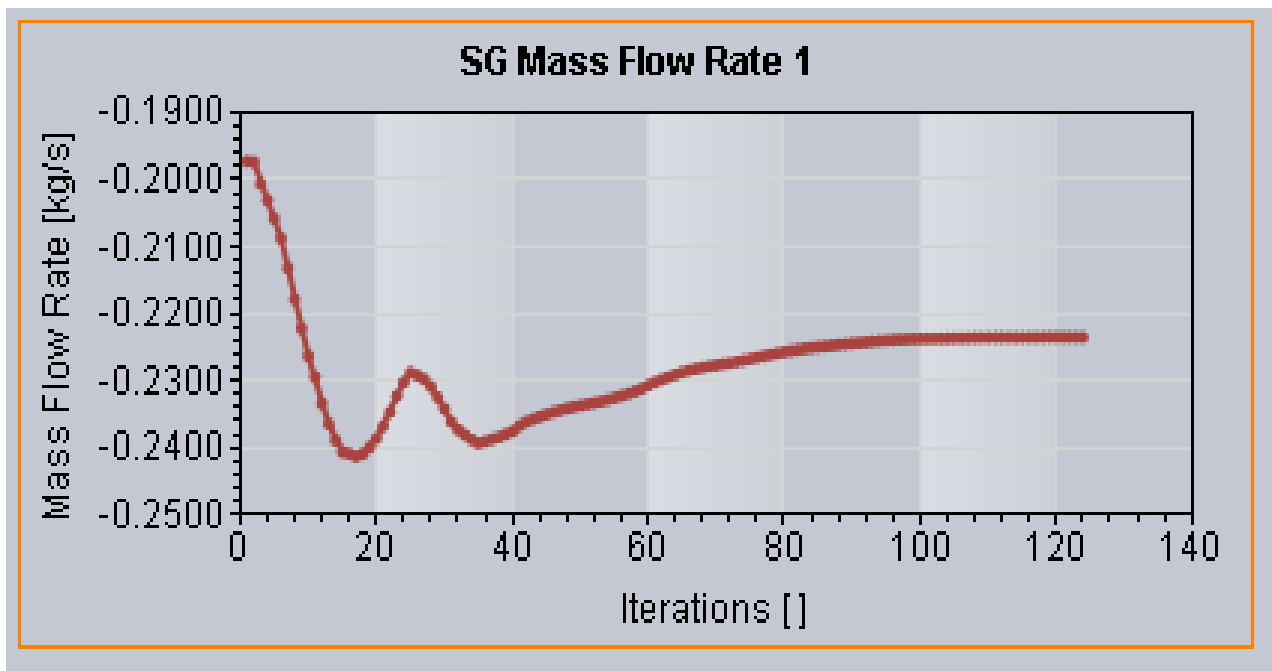
2.2 paveikslėlyje matytas ribotuvas sumodeliuojamas naudojant „SolidWorks“ programinį paketą. Ribotuvo vidinis skersmuo susiaurėjimo vietoje yra 34 mm, o kitu atveju 33 mm. (2.10 pav.). Šio brėžinio pagalba, bus atliekama oro srauto simuliacija.



2.10 pav. Ribotuvas

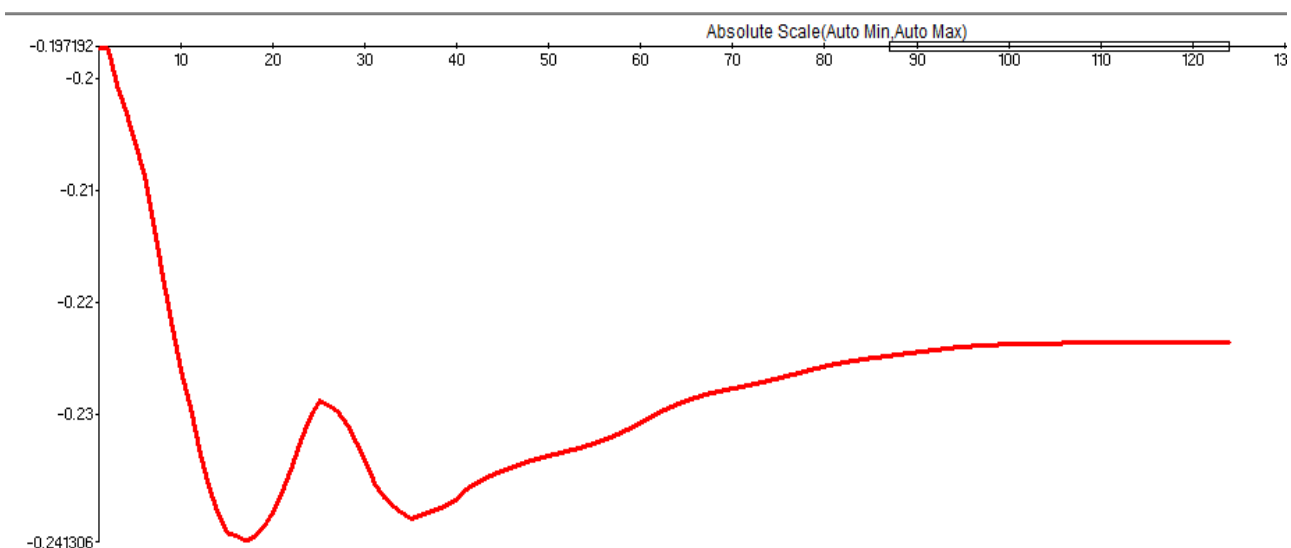
Sąlygos simuliacijai tokios: įėjime srauto greitis 60 m/s, atmosferos slėgis $0,98 \cdot 10^5$ Pa .

Atlikus simuliaciją, gaunama praeinančio oro srauto nuotrauka (2.11 pav.).



2.11 pav. Pratekantis oro srautas

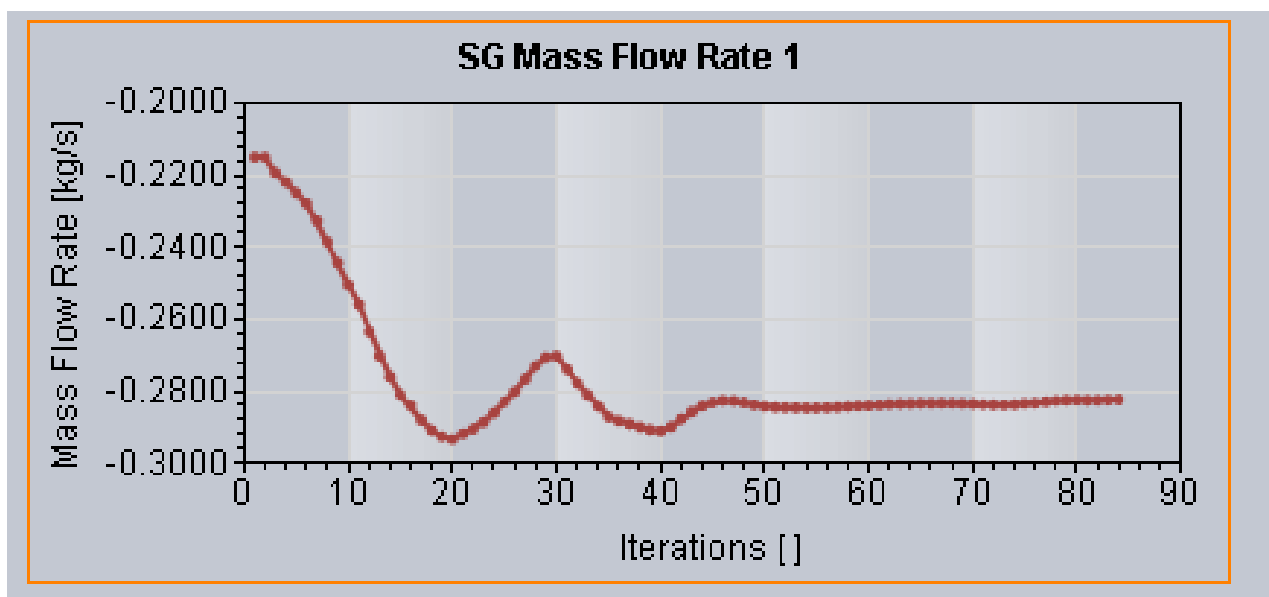
Nuotraukos pagrindu (2.11 pav.), nubraižomas oro srauto pokyčio grafikas (2.12 pav.). Iš jo matyti, kad minimalus srauto greitis sudaro 0,197kg/s, o maksimalus 0,241 kg/s.



2.12 pav. Oro srauto pokyčio grafikas

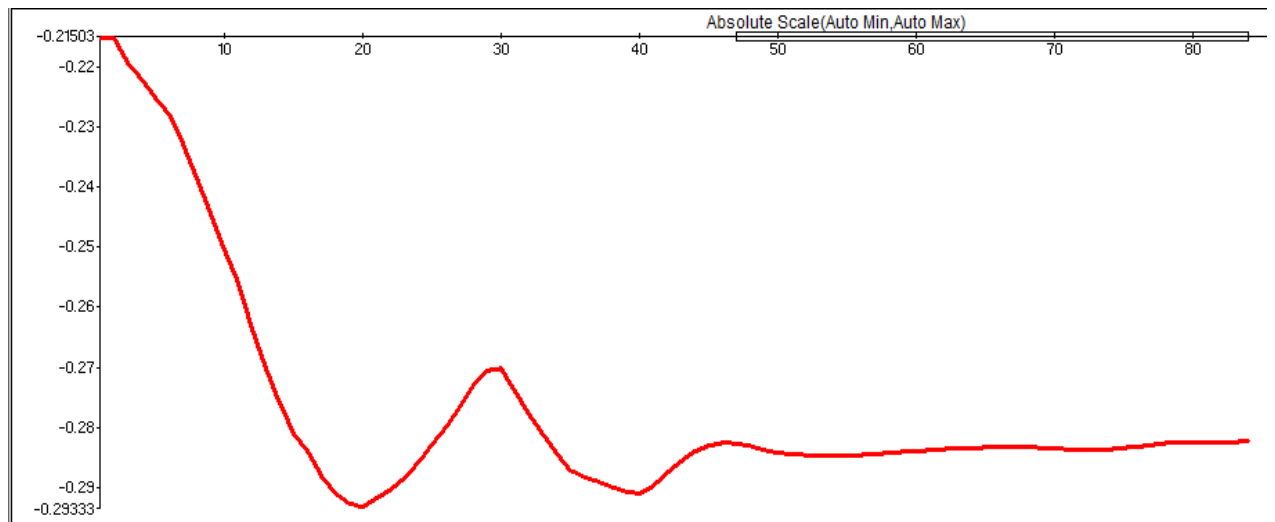
Tas pats pakartojama su 34 mm vidinio skersmens ribotuvo brėžiniu. Sąlygos tos pačios: įėjime srauto greitis 60 m/s, atmosferos slėgis $0,98 \cdot 10^5$ Pa.

Kaip ir prieš tai , gaunama praeinančio oro srauto nuotrauka (2.13 pav.)



2.13 pav. Pratekantis oro srautas

Nuotraukos pagrindu (2.13 pav.), nubraižomas oro srauto pokyčio grafikas (2.14 pav.). Iš jo matyti, kad minimalus srauto greitis sudaro 0,215kg/s, o maksimalus 0,293 kg/s.



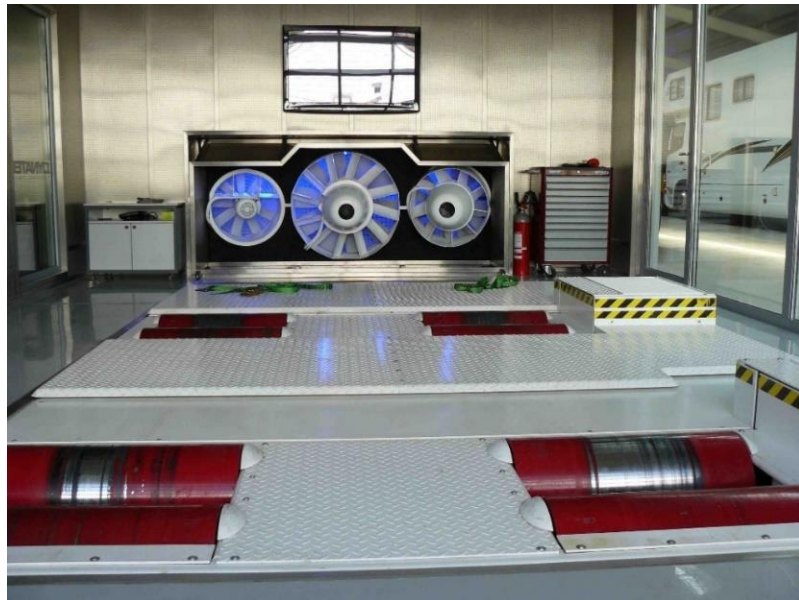
2.14 pav. Oro srauto pokyčio grafikas

Akivaizdžiai matyti, kad srautų greičiai skiriasi.

2.3. Eksperimentinis pasirinkto automobilio turbokompresoriaus parametrų tyrimas

Variklio galia matuojama mechaniniu, hidrauliniu arba elektriniu stabdymo stendu, esant atitinkamam aplinkos oro slėgiui ir 20° C temperatūrai. Išorinė variklio charakteristika gaunama esant didžiausiam galimam degalų tiekimui. Pasiiekus reikiamą sūkių dažnį, variklis stabdymo stende apkraunamas didžiausiu galimu sukimo momentu, kuris matavimo metu išlaikomas pastovus. Matavimai dažniausiai pradedami nuo 1000 min⁻¹ iki didžiausio sūkių dažnio (2100 – 2400 min⁻¹), matuojant atitinkamais intervalais, dažniausiai kas 100 min⁻¹. Sujungus gautus taškus koordinačių sistemoje virš sūkių dažnio nubrėžiama galios charakteristika. Tai galia, kurią konkrečiomis sąlygomis ir važiuodamas atitinkama pavara išvysto automobilis. Traukos galia mažesnė už aptartą efektyviają galią. Skirtumas sunaudojamas nuostoliams transmisijoje, GTV pavaroje ir šio veleno sukamoms agregatų darbinėms dalims, riedėjimo trinčiai, įkalnių, varančiųjų ratų buksavimui nugalėti, o atskirais atvejais ir greičių skirtumui, perjungiant pavaras, įveikti. Tačiau reikia pastebėti, kad traukos galiai turi įtakos ne tik nuostoliai pavaroje, bet ir automobilio masė (varančiųjų ratų apkrova) ir atraminis paviršius (ratų geometriniai matmenys ir slėgis padangose).

Labiausiai paplitę yra dviejų rūšių stendai: tai stendai, kai automobilis sukimo momentą perduoda per ratus (2.15 pav.) ir stendai, kai sukimo momentas perduodamas per stebules t. y. matavimo prietaisai pajungiami tiesiogiai prie stebulių (2.16 pav.)



2.15 pav. Ritininis galios matavimo stendas [39]



2.16 pav. Stebulinis galios matavimo stendas [40]

Darbe atliekamiems tyrimams pasitelktas „Dynamack™“ stebulinis galios matavimo stendas. Mažos eksploatacinės išlaidos ir naujoviškos technologijos leidžia valdyti 800 kW variklį su 800 W vienfaziu maitinimo lizdu. „Dynamack™“ tiesiogiai jungiasi prie ratų stebulių ir taiko tiksliai kontroliuojamą hidraulinę apkrovą.(2.17 pav.)



2.17 pav. Stendo pajungimas prie automobilio stebulių

Šis tiesioginio sukabinimo būdas reiškia, kad „Dynapack™” visada kontroliuoja automobilį. Kontroliuojant galingą automobilį ant ritinėlio „dyno”, kartais gali būti nelengvas uždavinys. Naudojantis „Dynapack™”, įgalinamas visas transporto priemonės valdymas, nes jo tiesioginis sujungimas neturi ratų slydimo. Dėl to rezultatai yra tikslesni ir pasiekiami per kelias sekundes.



2.18 pav. Pūtimo ir ištraukimo ventiliatoriai

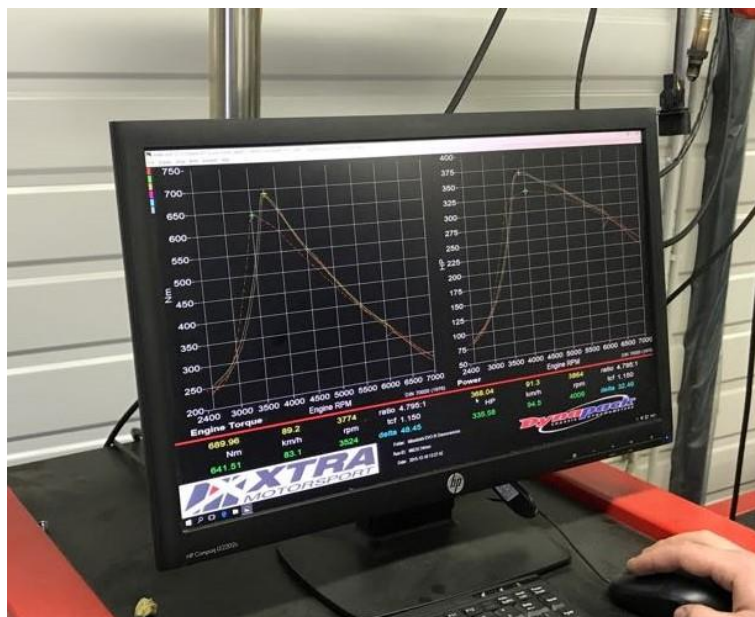
Pasirenkamas automobilis, kurio turbokompresorius yra pritaikytas ribotuvo montavimui (2.19 pav.). Bandymai atliekami su ribotuvais, kurių vidinis skersmuo yra 33 mm ir 34 mm. Automobilio ratai pakeičiami specialiais perėjimais, kurie sujungiami su apkrovą imituojančiais įrenginiais. Kad sąlygos atrodytų kuo artimesnės idealioms, naudojami ventiliatoriai ir ištraukimo sistema (2.18 pav.).



2.19 pav. „Mitsubishi Lancer EVO IX“ automobilis, prijungtas prie stendo

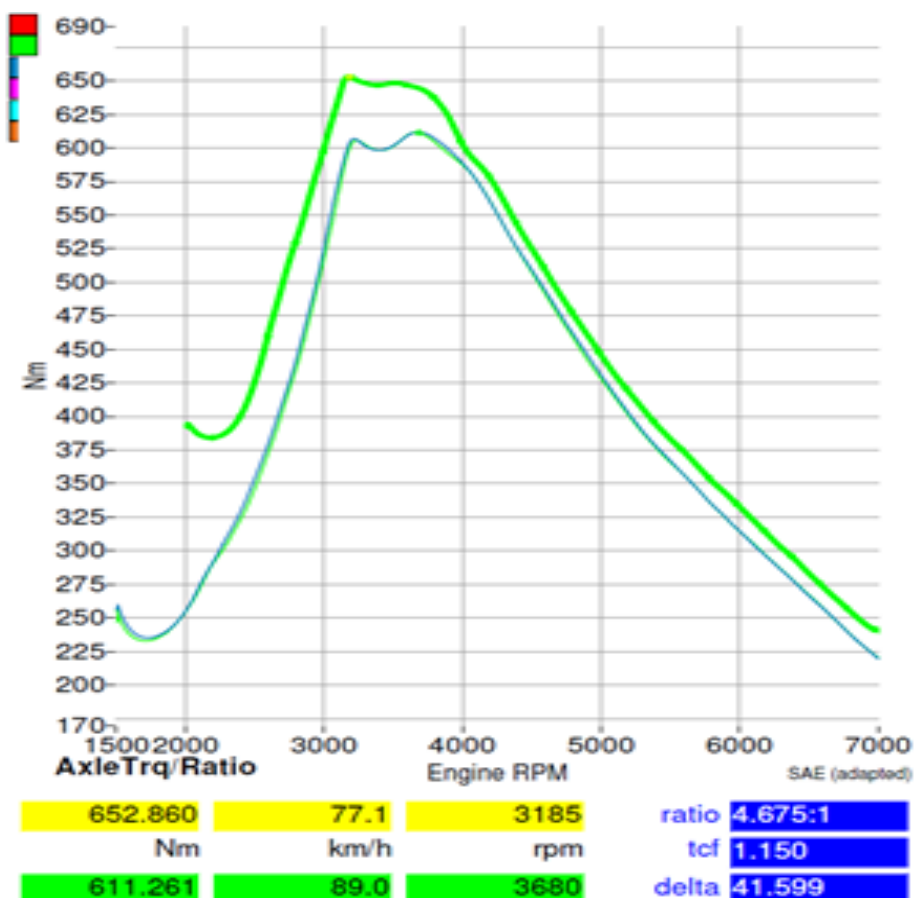
Paprastai matuojant galingumus yra pasirenkami du parametrai, kurie nekinta viso matavimo eigoje tai suspausto oro temperatūra (2.20 pav.) ir suspausto oro slėgis (2.21 pav.).

Atlikus būtinus darbus, gauti bendrieji rezultatai (2.20 pav.)

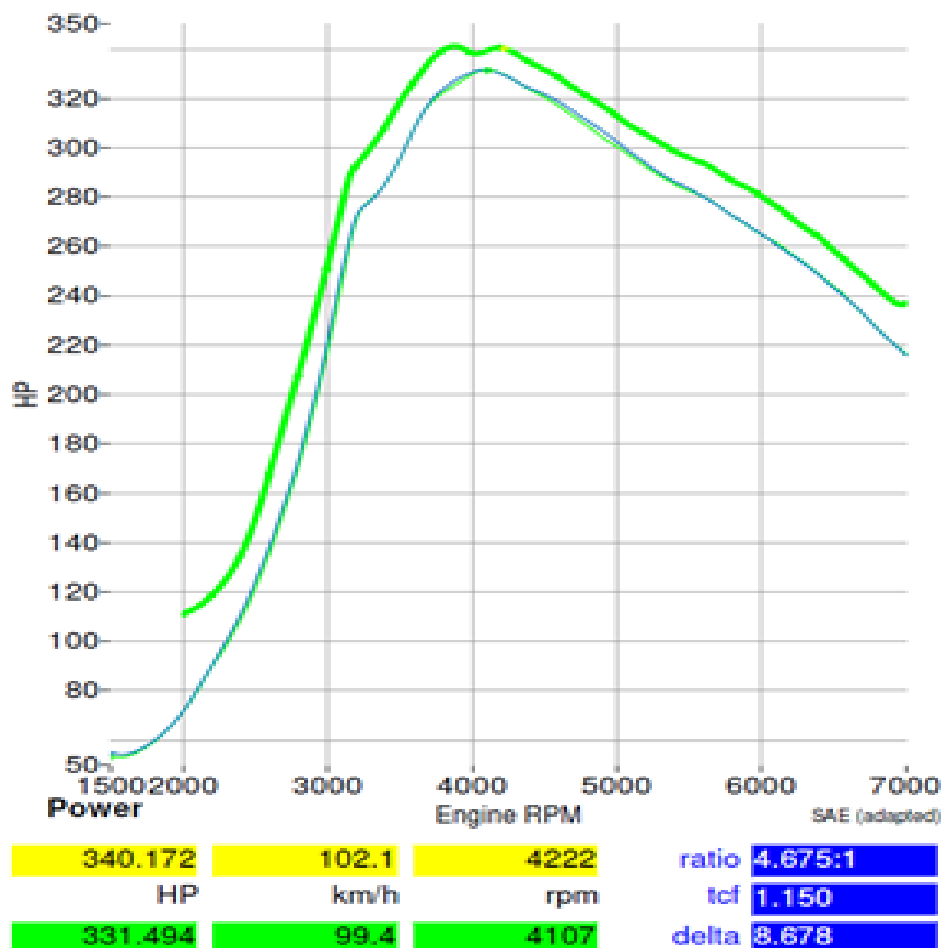


2.20 pav. Gauti natūrinių eksperimentų duomenys

Išanalizavus duomenis matyti, kad sukimo momento (2.21 pav.) ir galios (2.22 pav.) kreivės gerokai skiriasi. Sumontavus 34 mm ribotuvą, sukimo momentas gaunamas 652 Nm esant 3185 aps/min, o tuo tarpu su 33 mm ribotuvu buvo pasiektas 611 Nm esant 3680 sukimo momentui.



2.21 pav. Sukimo momento kreivės



2.22 pav. Galios kreivės

Galios kreivės taip pat gerokai skiriasi: su 33 mm ribotuvu gauta 331 AG (247 kW) esant 4107 aps/min, o su 34 mm ribotuvu gauta 340 AG (254 kW) esant 4222 aps/min .

3. Rezultatų apibendrinimas ir palyginimas

Tiriamajame projekte buvo naudojama „Mitsubishi Lancer EVO IX“ automobilių sportui skirta modifikacija su benzininiu 2,0 l varikliu su turbokompresoriumi. Turbokompresorius ir standartiniame, ir sportui skirtame variante iš esmės niekuo nesiskiria. Sportui skirtas turbokompresorius TD05HRA-16G6mC-10.5T turi ribotuvą, kuris yra pritvirtintas prieš kompresorių ir riboja į kompresorių patenkančio oro kiekį. Standartiniame automobilyje „Mitsubishi Lancer EVO IX“ sumontuotas variklis su turbokompresoriumi išvysto 291 arklio galią esant 392 Nm sukimo momentui. Sumontavus ribotuvą ir atitinkamai pakoregavus variklio valdymo bloką galima išgauti ir 330 AG .

Tiriamajame projekte naudojamo automobilio „Mitsubishi Lancer EVO IX“ turbokompresorius buvo pritaikytas ribotuvo montavimui. Bandymai buvo atliekami su ribotuvais, kurių vidinis skersmuo yra 33 mm ir 34 mm.

Darbe atliekamiems tyrimams buvo naudojamas „Dynapack™“ stebulinis galios matavimo stendas, kai sukimo momentas perduodamas per stebules t. y. matavimo prietaisai pajungiami tiesiogiai prie stebulių. Šis stendas buvo pasirinktas dėl:

- matavimo tikslumo;
- paprasto valdymo;
- nedidelių eksploatacinių išlaidų.

Darbe buvo atlikti analitiniai efektyviosios galios bei efektyvaus sukimo momento skaičiavimai esant 2 skirtingiems ribotuvo skersmenų dydžiams: Ø34 ir Ø33 mm. Po to galios matavimo stendo „Dynapack™“ pagalba buvo praktiškai išmatuoti automobilio „Mitsubishi Lancer EVO IX“ galia ir sukimo momentas 2 skirtingiems ribotuvo skersmens dydžiams: 34 ir 33 mm. Gauti rezultatai surašyti į 3.1 lentelę.

3.1 lentelė. Tyrimo duomenys

Ribotuvo skersmuo	Analitiniai tyrimai		Eksperimentiniai tyrimai		Skaitiniai tyrimai
	Efektyvioji galia, kW	Efektyvus sukimo momentas, Nm	Galia, gauta stendo pagalba, kW (AG)	Sukimo momentas, gautas stendo pagalba, Nm,	Maksimalus srauto greitis kg/s
34 mm	354	845	254 (340)	652	0,293
33 mm	241	578	247 (331)	611	0,241

Atlikus analitinius skaičiavimus bei natūrinius eksperimentinius bandymus, stendo „Dynapack™“ pagalba, buvo sukurtas skaitinis turbokompresoriaus oro ribotuvo modelis ir atlikta simuliacija programinio paketo „SolidWorks“ pagalba bei gauti skaitinių tyrimų rezultatai. Simuliacija parodė, kad netgi ir nežymiai skirtingų skersmenų ribotuvai sukuria skirtingus oro srautus, kurie įtakoja variklio galios ir sukimo momento charakteristikas.

Remiantis 3.1 lentelės duomenimis galima teigti, kad variklio su 34 mm skersmens ribotuvu parametrai yra efektyvesni už variklio su 33 mm skersmens ribotuvu. Galima daryti išvadą, kad

ribotuvo skersmenį padidinus vienu milimetru, ženkliai padidėja variklio galia bei sukimo momentas. Analitiniai skaičiavimai parodė, kad skirtumas yra 32 proc. Praktinių matavimų stendo „Dynapack™“ pagalba duomenys skiriasi 7 proc. Simuliacija „SolidWorks“ programinio paketo pagalba parodė, kad oro srauto greitis taip pat yra didesnis naudojant 34 mm skersmens ribotuvą.

IŠVADOS

1. Atlikus tiek teorinę literatūros šaltinių analizę, tiek ir išbandant automobilius praktinių važiavimų metu, nustatyta, kad pagrindiniai vidaus degimo variklio su turbokompresoriumi trūkumai, realizuojant dinamines automobilio charakteristikas – pavėluota turbokompresoriaus reakcija į akceleratoriaus paspaudimą „turbo duobė“, dėl rotoriaus inertiškumo taip pat mažas pripūtimo slėgis prie žemų variklio sūkių.
2. Atlikus analitinius tiriamojo turbokompresoriaus oro kiekio ribotuvo konstrukcinių charakteristikų įtakos vidaus degimo variklio jėginėms charakteristikoms, esant skirtingiems ribotuvų matmenims, skaičiavimus, nustatyta, kad esant ribotumo skersmeniui 33 mm, apskaičiuota automobilio efektyvioji galia yra 241 kW, o efektyvusis sukimo momentas 578 Nm. Padidinus ribotuvo skersmenį iki 34 mm, paskaičiuota efektyvioji galia padidėjo iki 254 kW, o efektyvusis sukimo momentas iki 845 Nm.
3. Eksperimentiškai išbandžius tiriamąjį automobilį „Dynapack“ stbuliniame galios matavimo stende, esant sumontuotam į tiriamojo automobilio variklio turbokompresorių oro srauto ribotuvui, gauti natūrinių tyrimų rezultatai parodė, kad esant oro srauto ribotuvo \varnothing 33 mm, išmatuotas sukimo momentas 611 Nm (prie 3680 aps/min) bei galia 247 kW (331 AG) (prie 4007 aps/min). Padidinus ribotuvo skersmenį iki \varnothing 34 mm, gautas sukimo momentas 652 Nm (prie 3185 aps/min), galia 254 kW (340 AG) (prie 4222 aps/min).
4. Darbe sukūrus skaitinį oro kiekio ribotuvo modelį ir atlikus jo parametrų skaitinį modeliavimą „SolidWorks“ programinio paketo pagalba, iš gautų simuliacijos rezultatų nustatyta, kad oro srauto greitis taip pat yra didesnis naudojant 34 mm ribotuvą nuo 0,241 kg/s (ribotuvo \varnothing 33 mm) iki 0,293 kg/s (ribotuvo \varnothing 34 mm).
5. Atlikus analitinių, skaitinių tyrimų skaičiavimų bei eksperimentinių rezultatų analizę, galima teigti, kad visais tirtais atvejais variklio su 34 mm skersmens ribotuvu parametrai yra efektyvesni už variklio su 33 mm skersmens ribotuvu. Ribotuvo skersmenį padidinus vienu milimetru ženkliai padidėja variklio galia bei sukimo momentas. Analitiniai skaičiavimai parodė, kad tarp \varnothing 33 mm skersmens ir \varnothing 34 mm skersmens ribotuvų gautų rezultatų skirtumas yra 32 proc. Praktinių matavimų stendo „Dynapack™“ pagalba duomenys skiriasi 7 proc. Simuliacija „SolidWorks“ programinio paketo pagalba parodė, kad oro srauto greitis taip pat skiriasi 18 proc.

Literatūros sąrašas

1. BUTELIAUSKAS, S. Automobilių sandara ir priežiūra. Vilnius: Generolo Jono Žemaičio Lietuvos karo akademija, 2008. ISBN 978-9955-423-71-3.
2. DULEVIČIUS, J., EIDUKYNAS, V., PILKAUSKAS, M., NAGINEVIČIENĖ, L. ir kt. Mašinų elementai. Kaunas: Technologija, 2000. ISBN 978-609-02-0118-3.
3. JAKŠTAS, A. Energijos transformavimo mašinos. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2000. Isbn 9986-05-552-0.
4. ŠAPALIENĖ, L., VALENTUKEVIČIENĖ, S., ZAKARIENĖ, J. Verslo plano ekonominių skaičiavimų pagrindai. Vilnius: Ciklonas, 2014. ISBN 978-609-8122-05-3.
5. KATAUSKIS, K. Finansinių skaičiavimų pagrindai. Vilnius: VU leidykla, 2010. ISBN 978-9955-33-591-7.
6. JUREVIČIUS, V., NANEVIČIUS, L. Automobilių remontininko rengimas. 2 knyga. Automobilio variklis. Vilnius: Profesinio mokymo metodikos centras, 2008. ISBN 978-9955-748-19-9.
7. MARTINKUS, B., SAKALAS, A., SAVANEVIČIENĖ, A.. Darbo išteklių ekonomika ir valdymas. Kaunas: Technologija, 2006. . ISBN 9955-25-086-0.
8. SIMANA VIČIENĖ Ž. Inžinerinių sprendimų ekonomika. Kaunas: Technologija. 2011. ISBN 978-609-02-0112-1.
9. BELL, Corky. Maximum Boost: Designing, Testing and Installing Turbocharger Systems. Cambridge: Bentley publishers, 1997. ISBN 0-8376-0360-6.
10. MILLER, Jay K. Turbo: Real World High-Performance Turbocharger Systems. North Branch: CarTech, 2008. ISBN 978-1-61325-017-4.
11. HARTMAN, Jeff. Turbocharging Performance Handbook. Mineapolis: Motorbooks, 2007. ISBN 978-0-7603-2805-7
12. WARNER, Mark. Street Turbocharging HP1488: Design, Fabrication, Installation, and Tuning of High-Performance Street Turbocharger Systems [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 11 09]. Prieiga internete:
<https://books.google.lt/books?id=gfpuTeliy0EC&printsec=frontcover&dq=Mark+Warner,+Street+TurbochargingHP1488:&hl=lt&sa=X&ved=0ahUKEwjm4P3Kyt7hAhVE66QKHR-7BFgQ6AEIKjAA#v=onepage&q=Mark%20Warner%2C%20Street%20TurbochargingHP1488%3A&f=false>
13. WAGONER, Robert Greg. Turbocharging Normally Aspirated Engines on a Budget, 2012 [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 10 07]. Prieiga internete:
<https://books.google.lt/books?id=hC7sAwAAQBAJ&pg=PA56&dq=13.%09Robert+Greg+Wagone r,+Turbocharging+Normally+Aspirated+Engines+on+a+Budget&hl=lt&sa=X&ved=0ahUKEwik05zSy97hAhWNsaQKHf0kC9MQ6AEIKDAA#v=onepage&q=13.%09Robert%20Greg%20Wagoner%2C%20Turbocharging%20Normally%20Aspirated%20Engines%20on%20a%20Budget&f=false>
14. ГАЛЕРКИН, Ю.Б. Турбокомпрессоры. Рабочий процесс, расчет и проектирование рабочей части, 2008 [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 12 10]. Prieiga internete:
https://zinref.ru/000_uchebniki/01500_gaz/312_turbokompresory-galerkin-2008/000.htm
15. АСТАШЕНКО, С. Б. Турбокомпрессоры. Минск: Автостиль, 2002. ISBN 985-6162-50-5.
16. ERJAVEC, Jack, THOMPSON, Rob. Automotive Technology A Systems Approach. New York: Delmar. ISBN 978-1-133-61231-5.
17. BUTKUS, A. Automobilių ir traktorių variklių projektavimas: vadovėlis. Vilnius: Mokslas, 1985.

18. ЛИХАНОВ, В.А. ДЕВЕТЬЯРОВ, Р.Р.. Расчёт двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие. Киров: Вятская ГСХА, 2008 [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 10 17]. Prieiga internete: <https://www.twirpx.com/file/1144242/>
19. ШАРОГЛАЗОВ, Б.А., ФАРАФОНТОВ Ф.А., КЛЕМЕНТЬЕВ В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов. Челябинск: ЮУрГУ, 2004 [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 10 17]. Prieiga internete: <https://www.twirpx.com/file/156289/>
20. ШАТРОВ, М.Г. Автомобильные двигатели: курсовое проектирование: учебное пособие. Москва: Академия, 2011. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 10 17]. Prieiga internete: <https://www.twirpx.com/file/549770/>
21. Scroll-type supercharger [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 10 25]. Prieiga internete: http://en.wikipedia.org/wiki/Scroll-type_supercharger
22. FIA regulations [interaktyvus]. [Žiūrėta 2019 02 10]. Prieiga internete: <http://www.fia.com/regulation/category/123>.
23. За рулем №9 [interaktyvus]. [Žiūrėta 2019 02 15]. Prieiga internete: https://www.liveinternet.ru/community/rss_jurnalik_org/post371294087/
24. Dyzelinių variklių remontas [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 11 15]. Prieiga internete: <http://www.autodirbtuve.lt/index.php?page=dyzeliniu-varikliu-remontas>
25. How to size a wastegate [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 10 15]. Prieiga internete: <http://www.fiercecontrollers.com/uncategorized/how-to-size-a-wastegate/>
26. Turbo and parts catalog [interaktyvus]. [Žiūrėta 2019 03 20]. Prieiga internete: http://www.atpturbo.com/mm5/merchant.mvc?Screen=PROD&Product_Code=ATP-VVW-191&Category_Code=AB7
27. Mitsubishi klubo forumas [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 03 10]. Prieiga internete: <http://www.mitsubishi-klubas.lt/forumas/viewtopic.php?f=24&t=8966>
28. Olivier Rabiller [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 11 20]. Prieiga internete: <https://europe.autonews.com/awards/2015-rising-stars-europe-olivier-rabiller>
29. Mazda forumas [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 11 15]. Prieiga internete: <https://www.mazdas247.com/forum/archive/index.php/t-123641.html>
30. Turbinos restriktorius Mitsubishi Evo9 [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 09 15]. Prieiga internete: <http://www.rallyandracing.biz/aliuminio-dalys/turbinos-restriktorius-mitsubishi-evo9.html?lang=2>
31. Automotive Garage for General vehicle, Racing, Audio, Wiring and Modification [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 06 12]. Prieiga internete: <https://psgarage.blogspot.lt/2012/09/anti-lag-als.html>
32. Autospeed [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 05 12]. Prieiga internete: <http://blog.autospeed.com/>
33. Autokata [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 05 12]. Prieiga internete: <http://www.autokata.lt/>
34. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2009/33/EB dėl skatinimo naudoti netaršias ir efektyviai energiją vartojančias kelių transporto priemones [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 10 12]. Prieiga internete: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A32009L0033>
35. Examples of Vehicles Mapped on the TDP.ie DynaPack 8000 Evolution Chassis Dynamometer [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 09 30]. Prieiga internete: <http://www.tdp.ie/index.php/category/dynapack-graph>
36. Turbokompresorių gedimo priežastys [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 11 05]. Prieiga internete: <http://turboservisas.lt/placiau/turbokompresoriu-gedimo-priezastys>
37. Sujungimai.Suvirinamieji sujungimai [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 11 14]. Prieiga internete: <http://www.mechanikosinzinierius.lt/wp-content/uploads/2015/08/me1-05.pdf>

38. Mitsubishi Lancer Evolution Manuals [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 11 10]. Prieiga internete: <https://evoscan.com/vehicle-manuals>
39. Automobilių variklių galios matavimo ypatumai [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 11 09]. Prieiga internete: <http://www.98.lt:81/automobilio-variklio-galios-matavimas>
40. Xtra motorsport [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 11 10]. Prieiga internete: <https://www.facebook.com/xtraracing/>
41. MAČERINSKAS, Paulius ir kt. Lengvųjų automobilių variklių oro pripūtimo agregatai ir sistemos. Marijampolė: Druka, 2018.