



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Vidaus degimo variklio degalų tiekimo sistemų parametru tyrimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Paulius Tiuliutinas

Projekto autorius

Doc. Aurimas Česnulevičius

Vadovas

Panevėžys, 2022



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Vidaus degimo variklio degalų tiekimo sistemų parametru tyrimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

Paulius Tiuliutinas

Projekto autorius

Doc. Aurimas Česnulevičius

Vadovas

Recenzentas / Recenzentė

Panevėžys, 2022



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Paulius Tiuliutinas

Vidaus degimo variklio degalų tiekimo sistemų parametru tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Paulius Tiuliutinas

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

TVIRTINU
TVKC vadovė
Doc. dr. Nida Kvedaraitė

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Diplomantui **Pauliui Tiuliutinui**

Baigiamojo projekto tema (lietuvių kalba)	Vidaus degimo variklio degalų tiekimo sistemų parametrų tyrimas
Baigiamojo projekto tema (anglų kalba)	Research of the Parameters of Internal Combustion Engine Fuel Supply Systems

Patvirtinta 2022 m. balandžio 11 d. dekanų potvarkiu Nr. V25-13-10

Parengto baigiamojo projekto įkėlimo į Moodle aplinką terminas iki 2022 m. birželio 1 d.

Duomenys, reikalavimai ir sąlygos baigiamajam projektui

Ištirti skirtingų degalų tiekimo sistemų įtaką degalų sąnaudoms, žalingų emisijų kiekiui ir galiai realiomis sąlygomis naudojant tą patį automobilį

Baigiamojo projekto užduotys / uždaviniai, kurie turi būti atskleisti projekte

1. Atlikti užsienio ir Lietuvos autorių mokslinių darbų apžvalgą, kuriuose tiriamas suskystintų naftos dujų (toliau - SND) naudojimas kibirkštinio uždegimo varikliuose.
2. Aprašyti pirmos ir ketvirtos kartos SND tiekimo sistemų galimybes, skirtumas ir keliamus automobiliui reikalavimus.
3. Išanalizuoti universalios kibirkštinio uždegimo variklio valdymo bloko poreikį, palyginti degalų tiekimo skaičiavimo metodus ir variklio valdymo galimybes.
4. Aprašyti degalų sąnaudas, žalingų emisijų kiekį ir galią varikliui dirbant benzinu, SND pirmos kartos įranga, SND ketvirtos kartos įranga ir SND ketvirtos kartos įranga papildomai keičiant uždegimo paankstinimo kampą programuojamo elektroninio variklio valdymo bloko pagalba.

Vadovas doc. Aurimas Česnulevičius
(vadovo pareigos, vardas, pavardė, parašas)

Užduotį gavau Paulius Tiuliutinas
(studento vardas, pavardė, parašas)

2022 m. balandžio 21 d.

Tiuliutinas, Paulius. Vidaus degimo variklio degalų tiekimo sistemų parametrų tyrimas. Magistro studijų baigiamasis projektas vadovas doc. Aurimas Česnulevičius; Kauno technologijos universitetas Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų kryptių grupė): transporto priemonių inžinerija, technologijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: kibirkštinio uždegimo variklis, degalų tiekimo sistemos, SND, oro-degalų santykis.

Panevėžys, 2022. 63 p.

Santrauka

Baigiamojo projekto objektas – degalų tiekimo sistemos. Pagrindinis projekto tikslas yra ištirti skirtingų degalų tiekimo sistemų įtaką variklio galiai, degalų sąnaudoms ir išmetamųjų dujų žalingoms emisijoms. Projektą sudaro keturi skyriai:

1-ame skyriuje atlikta užsienio ir Lietuvos autorių mokslinės literatūros apžvalga, kurioje nagrinėjama ir lyginama skirtingų suskystintų naftos dujų ir benzino tiekimo sistemų įtaka variklio galiai, išmetamosioms dujoms ir degalų sąnaudoms.

2-ame skyriuje aprašytos dviejų populiariausių suskystintų naftos dujų tiekimo sistemų galimybės, skirtumai, ir reikalavimai variklio benzino tiekimo sistemai.

3-ame skyriuje išanalizuojamas universalus kibirkštinio uždegimo variklio valdymo bloko poreikis, palyginami degalų tiekimo skaičiavimo metodai ir variklio valdymo galimybės.

4-ame skyriuje atlikti tyrimai realiomis sąlygomis vienam automobiliui naudojant benzino ir skirtingas suskystintų naftos dujų tiekimo sistemas lyginant variklio degalų sąnaudas, galią ir žalingas išmetamųjų dujų emisijas.

Tiuliutinas, Paulius. Research of the Parameters of Internal Combustion Engine Fuel Supply Systems. Master's Final Degree Project. Supervisor doc. Aurimas Česnulevičius. The Panevėžys Faculty of Technologies and Business, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Transport Engineering, Technology Sciences.

Keywords: spark ignition engine, fuel supply systems, LPG, AFR.

Panevėžys, 2022. Number of pages – 63.

Summary

The object of the final project – fuel supply systems. The main goal of the project is to investigate the influence of different fuel supply systems on engine power, fuel consumption and harmful emissions. The project consists of four chapters:

In Chapter 1 a review of the scientific literature of foreign and Lithuanian authors is made, which analyzes and compares the influence of different liquefied petroleum gas and gasoline supply systems on engine power, exhaust gas and fuel consumption.

In Chapter 2 capabilities, differences, and requirements for an engine gasoline supply system are described for two most popular liquefied petroleum gas supply systems.

Chapter 3 analyzes the need for a universal spark ignition engine control unit; fuel supply calculation methods and engine control options.

In Chapter 4 real-time studies using petrol and different liquefied petroleum gas supply systems per car are made to compare engine fuel consumption, power, and harmful exhaust emissions.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	11
Įvadas.....	12
1. Literatūros apžvalga ir analizė.....	13
2. Suskystintų naftos dujų tiekimo sistemos.....	25
2.1. Pirmos kartos sistema	27
2.2. Ketvirtos kartos sistema	29
3. Universalus kibirkštinio uždegimo variklio valdymo bloko analizė.....	31
3.1. Tiekiamų degalų skaičiavimo algoritmai	31
3.1.1. Skaičiavimo metodas naudojant oro srauto jutiklį	31
3.1.2. Skaičiavimo metodas naudojant oro slėgio ir temperatūros jutiklius.....	32
3.1.3. Skaičiavimo metodas naudojant droselinės sklendės padėties jutiklį	33
3.1.4. Speed-density algoritmo skaičiavimai.....	33
3.2. Papildomi EVB naudojami jutikliai	36
3.3. Oro-degalų mišinys	37
3.4. Naudojimas kartu su SND tiekimo sistema.....	38
4. Degalų tiekimo sistemų tyrimas	39
4.1. Degalų sąnaudų tyrimas	39
4.1.1. Matavimo metodika.....	39
4.1.2. Benzino sąnaudų tyrimas.....	39
4.1.3. Dujų sąnaudų tyrimas	43
4.2. Variklio galios tyrimas	47
4.2.1. Įsibėgėjimo tyrimo metodika.....	47
4.2.2. Įsibėgėjimo tyrimo rezultatai naudojant benzino įpurškimo sistemą	47
4.2.3. Įsibėgėjimo tyrimo rezultatai naudojant SND tiekimo sistemas	52
4.2.4. Variklio galios skaičiavimas.....	57
4.3. Žalingų išmetamųjų dujų emisijų matavimas.....	58
Išvados	61
Literatūros sąrašas	62

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Dažniausiai naudojami SND mišiniai skirtingose šalyse [13]	25
2 lentelė. SND klasės [13].....	25
3 lentelė. SND ir benzino savybės [15-17]	26
4 lentelė. Svarstyklių techniniai duomenys [19]	43
5 lentelė. Dujų sąnaudų matavimo rezultatai	45
6 lentelė. Galios skaičiavimo rezultatai	58
7 lentelė. Dujų analizatoriaus techniniai duomenys [20]	58
8 lentelė. Variklio darbo parametrai emisijų matavimo metu.....	58

Paveikslų sąrašas

1 pav. Eksperimento schema. a – SND bakas 50°C vandenyje; b – kompensacinis SND bakas su elektriniais šildytuvais; c – SND valdymo vožtuvas; d – šiluminis srauto matuoklis; e – dujų purkštukai; f – oro srauto matuoklė; g – oro kolektorius; h – variklis; i – dinamometrinis galios matavimo stendas; j – stendo stabdys; k – stendo valdymo blokas; l – CH ir NO, NO _x analizatoriai; m – CO ir CO ₂ analizatorius; n – slėgio cilindre jutiklis; o – alkūninio veleno padėties jutiklis; p – duomenų surinkimo sistema; q – stalinis kompiuteris; r – dujų įpurškimo EVB [4]	13
2 pav. Eksperimento metu gauti galios ir efektyvumo rezultatai [4]	14
3 pav. Eksperimento metu gauti emisijų ir išmetamųjų dujų temperatūros rezultatai [4]	15
4 pav. Tyrimo rezultatai esant 25% droselinės sklendės atidarymui [5]	16
5 pav. Galios-specifinės degalų sąnaudos esant 25% droselinės sklendės atidarymui (dujų karbiuracija dirbo nestabiliai esant 2500aps/min) [5]	17
6 pav. Vidutinio stūmoklį veikiančio slėgio kitimo priklausomybė nuo oro-degalų santykio ir degalų rūšies [6]	18
7 pav. CO, CO ₂ ir CH emisijų priklausomybė nuo mišinio liesumo ir degalų rūšies [6]	18
8 pav. Degimo laiko priklausomybė nuo mišinio liesumo ir degalų rūšies [6].....	19
9 pav. Eksperimento ant dinamometrinio stendo schema [7]	20
10 pav. Simuliacijos ir dinamometrinio stendo eksperimentų rezultatų palyginimas [7].....	21
11 pav. Įsibėgėjimo bandymų rezultatai [7].....	21
12 pav. Simuliacijos metu gauti emisijų rezultatai [7].....	22
13 pav. Maksimalios temperatūros cilindre palyginimas [8]	22
14 pav. Variklio galios palyginimas [8].....	23
15 pav. Variklio efektyvumo palyginimas [8]	23
16 pav. Dujų slėgio priklausomybė nuo temperatūros ir propano/butano santykio [12]	26
17 pav. Benzino ir SND kainų statistika [18]	27
18 pav. Pirmos kartos dujų tiekimo schema. 1 – SND bakas; 2 – SND tiekimo vožtuvas; 3 – SND reduktorius-garintuvas; 4 – rankinis dujų srauto reguliavimo vožtuvas; 5 – dujų maišytuvas; 6 – benzino tiekimo sistema; 7 – benzino tiekimo vožtuvas; 8 – benzino bakas; 9 – degalų rūšies perjungiklis [26]	28
19 pav. Ketvirtos kartos dujų tiekimo schema. 1 - SND bakas; 2 – benzino bakas; 3 – SND reduktorius-garintuvas su temperatūros jutikliu; 4 – dujų slėgio ir temperatūros jutikliai; 5 – dujų purkštukai; 6 – benzino purkštukai; 7 – benzino tiekimo EVB; 8 – dujų tiekimo EVB; 9 – deguonies jutiklis; 10 – SND elektromagnetinis vožtuvas [26]	29
20 pav. MAF jutiklis [26]	32
21 pav. Vartotojo sudaroma variklio tūrinio efektyvumo lentelė	36
22 pav. Vartotojo sudaroma oro-degalų santykių lentelė uždaro rato degiojo mišinio korekcijai pagal lambda jutiklį	37
23 pav. Galutinio purkštukų atidarymo laiko priklausomybė nuo MAP ir VE	40
24 pav. MAP (→), TPS (→) ir automobilio greičio (balta kreivė) reikšmių kitimas benzino sąnaudų matavimo metu	41
25 pav. Įpurkšto benzino tūris ir greičio svyravimas benzino sąnaudų matavimo metu	42
26 pav. Oro-degalų ekvivalentiškumo santykis benzino sąnaudų tyrimo metu.....	43
27 pav. AFR lentelės pakeitimai: a – antro bandymu metu naudojama lentelė, b – trečio bandymo metu naudojama lentelė.....	44

28 pav. Uždegimo paankstinimo lentelės pakeitimai: a – pirmo ir antro bandymu metu naudojama lentelė, b – trečio bandymo metu naudojama lentelė	45
29 pav. Oro-degalų ekvivalentiškumo santykiai SND sąnaudų tyrimo metu	46
30 pav. Įsiurbimo kolektoriaus slėgiai SND sistemų bandymu metu	46
30 pav. 60-120km/h įsibėgėjimo rezultatai naudojant benzino įpurškimo sistemą	47
31 pav. 60-120km/h įsibėgėjimo laikai naudojant benzino įpurškimo sistemą	48
32 pav. 70-120km/h įsibėgėjimo rezultatai naudojant benzino įpurškimo sistemą	48
33 pav. 70-120km/h įsibėgėjimo laikai naudojant benzino įpurškimo sistemą	49
34 pav. 60-70 km/h įsibėgėjimo laiko priklausomybė nuo pradinio greičio naudojant benzino įpurškimo sistemą	49
35 pav. AFR kitimas dėl pagreičio korekcijos veikimo naudojant benzino įpurškimo sistemą	50
36 pav. Įpurškimo laiko korekcijos veikimo priklausomybė nuo TPS kitimo greičio naudojant benzino įpurškimo sistemą	50
37 pav. Oro-degalų ekvivalentiškumo santykiai 70-120km/h įsibėgėjimo metu naudojant benzino įpurškimo sistemą	51
38 pav. Fiksuotos ir apskaičiuotos vidutinės oro-degalų ekvivalentiškumo santykio reikšmės	51
39 pav. Įsibėgėjimo nuo 70 iki 120km/h rezultatai naudojant SND 1-os kartos įrangą	52
40 pav. Oro-degalų ekvivalentiškumo santykiai ir droselinės sklendės padėtis 60-70 km/h įsibėgėjimo pradžioje naudojant 1-os kartos SND įrangą	52
41 pav. Oro-degalų ekvivalentiškumo santykiai 70-120 km/h įsibėgėjimo metu naudojant 1-os kartos SND įrangą	53
42 pav. Įsibėgėjimo nuo 70 iki 120km/h rezultatai naudojant SND 4-os kartos įrangą	53
43 pav. AFR ir TPS 60-70 km/h įsibėgėjimo pradžioje naudojant 4-os kartos SND įrangą	54
44 pav. Oro-degalų ekvivalentiškumo santykiai 70-120 km/h įsibėgėjimo metu naudojant 4-os kartos SND įrangą	54
45 pav. Įsibėgėjimo nuo 70 iki 120km/h rezultatai naudojant SND 4-os kartos įrangą ir papildomai keičiant benzino EVB parametrus	55
46 pav. Oro-degalų santykio ir uždegimo paankstinimo kampo pakeitimai. a, c – pradiniai parametrai; b, d – pakeisti parametrai	55
47 pav. AFR ir TPS 60-70 km/h įsibėgėjimo pradžioje naudojant 4-os kartos SND įrangą ir papildomai keičiant benzino EVB parametrus	56
48 pav. Oro-degalų ekvivalentiškumo santykiai 70-120 km/h įsibėgėjimo metu naudojant 4-os kartos SND įrangą ir papildomais benzino EVB parametrų pakeitimais	56
49 pav. Apskaičiuoto greičio 3 pavara (—), pagreičio (—) ir galios (balta kreivė) grafikai bei droselinės sklendės padėtis (—) vieno bandymo metu	57
50 pav. Išmetamųjų dujų emisijų matavimo rezultatai	59

Santrumpų ir terminų sąrašas

AFR – oro su degalais masės santykis (angl. air fuel ratio);

BTDC – uždegimo paankstinimo kampas alkūninio veleno pasisukimo laipsniais prieš stūmoklio viršutinį mirties tašką (angl. before top dead centre)

CH – angliavandeniliai;

CO – anglies monoksidas;

CO₂ – anglies dioksidas;

EVB – elektroninis valdymo blokas;

Liesas degusis mišinys – degusis mišinys, kurio oro-degalų masės santykis yra didesnis nei stochiometrinis;

MAF – oro srauto jutiklis (angl. mass air flow);

MAP – įsiurbimo kolektoriaus slėgis (angl. manifold absolute pressure);

MBT – mažiausias uždegimo paankstinimo kampas, kad pasiekti didžiausią variklio sukimo momentą (angl. minimum advance for best torque);

NO_x – azoto oksidai;

Riebus degusis mišinys - degusis mišinys, kurio oro-degalų masės santykis yra mažesnis nei stochiometrinis;

RON – degalų oktaninis skaičius, nustatytas variklyje keičiant suspaudimo laipsnį (angl. reaserch octane number);

SND – suskystintos naftos dujos;

Speed-density – oro masės skaičiavimo algoritmas, kuris remiasi oro slėgio ir oro temperatūros jutiklių duomenimis;

TPS – droselinės sklendės padėties jutiklis (angl. throttle position sensor);

VE – variklio tūrinis efektyvumas (angl. volumetric efficiency)

Įvadas

Temos aktualumas. Lengvieji automobiliai suvartoja apie 44% pasaulinės transporto energijos [1] ir naftos pagrindu pagaminti skystieji degalai tiekia apie 95% visos šios energijos. Transportas bendrai išmeta apie 23% pasaulio anglies dvideginio (toliau - CO₂) [2] ir 70% anglies monoksido (toliau – CO) emisijų, kartu su nesudegusių angliavandenilių ir azoto oksidų (toliau - CH ir NO_x) [3] emisijom. Vidaus degimo varikliai naudojami beveik visose pasaulio transporto priemonėse, o kibirkštinio uždegimo varikliai varo apie 80% visų lengvųjų keleivinių automobilių pasaulyje [2]. Gerokai švaresnė, pigesnė ir lengviausiai Lietuvoje prieinama alternatyva benziniui kibirkštinio uždegimo varikliuose yra suskystintos naftos dujos (toliau - SND), tačiau senesniuose automobiliuose, kuriuose buvo naudojamas mechaninis benzino tiekimo valdymas, montuojamos tik labai paprastos SND tiekimo sistemos, kurios neturi jokio atgalinio ryšio degalų tiekimo valdyme ir negali užtikrinti kuo mažesnių variklio kenksmingų dujų emisijų, degalų sąnaudų ir kuo didesnės variklio galios. Norint pasiekti geresnius rezultatus, reikia turėti galimybę tiksliai valdyti variklio darbo parametrus, iš kurių svarbiausi – tikslus tiekiamų degalų kiekis ir degiojo mišinio uždegimo paankstinimo kampas. Tai galima padaryti perdarant degalų tiekimo sistemą iš mechaninės į elektroninę ir panaudojant universalius variklių valdiklius, kurie konfigūruojami pagal vartotojo poreikius individualiai kiekvienam varikliui.

Baigiamojo projekto objektas – Degalų tiekimo sistemos.

Baigiamojo projekto tikslas – Iširti skirtingų degalų tiekimo sistemų įtaką degalų sąnaudoms, žalingų emisijų kiekiui ir galiai realiomis sąlygomis naudojant tą patį automobilį.

Baigiamojo projekto uždaviniai:

1. Atlikti užsienio ir Lietuvos autorių mokslinių darbų apžvalgą, kuriuose tiriamas suskystintų naftos dujų naudojimas kibirkštinio uždegimo varikliuose.
2. Palyginti pirmos ir ketvirtos kartos SND tiekimo sistemų galimybes, skirtumus ir keliamus automobiliui reikalavimus.
3. Išanalizuoti universalus kibirkštinio uždegimo variklio valdymo bloko poreikį, palyginti degalų tiekimo skaičiavimo metodus ir variklio valdymo galimybes.
4. Palyginti degalų sąnaudas, žalingų emisijų kiekį ir galią varikliui naudojant benzino įpurškimą, SND pirmos kartos įranga, SND ketvirtos kartos įranga ir SND ketvirtos kartos įranga papildomai keičiant uždegimo paankstinimo kampą programuojamo elektroninio variklio valdymo bloko pagalba.

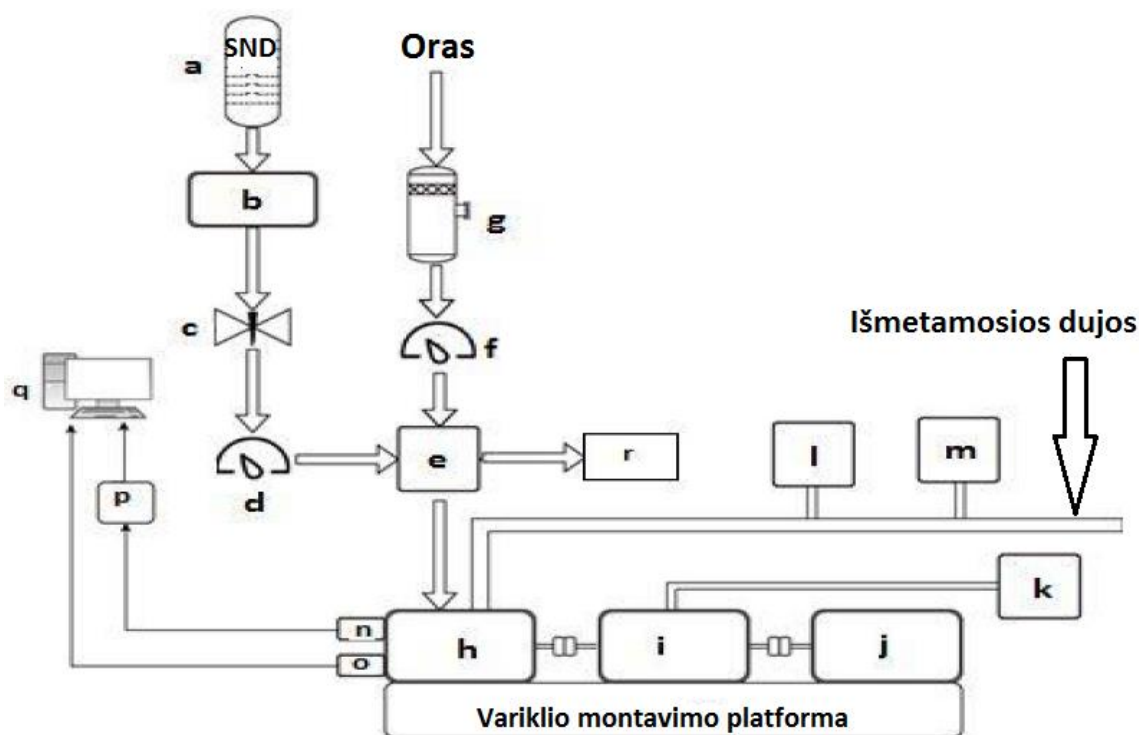
Pranešimai ir moksliniai darbai baigiamojo projekto tematika. Mokslinės konferencijos „Technologijų ir verslo aktualijos – 2021“ metu skaitytas pranešimas „SND panaudojimo įtaka benzininio variklio darbo parametrams“.

Baigiamojo projekto sandara ir apimtis. Baigiamąjį projektą sudaro akademinio sąžiningumo deklaracija, projekto užduotis, santrauka lietuvių ir anglų kalbomis, lentelių, paveikslų ir santrumpų sąrašai, įvadas, keturi skyriai, išvados ir literatūros sąrašas. Aiškinamojo rašto apimtis: 63p., kuriuose yra 50 paveikslų ir 8 lentelės.

1. Literatūros apžvalga ir analizė

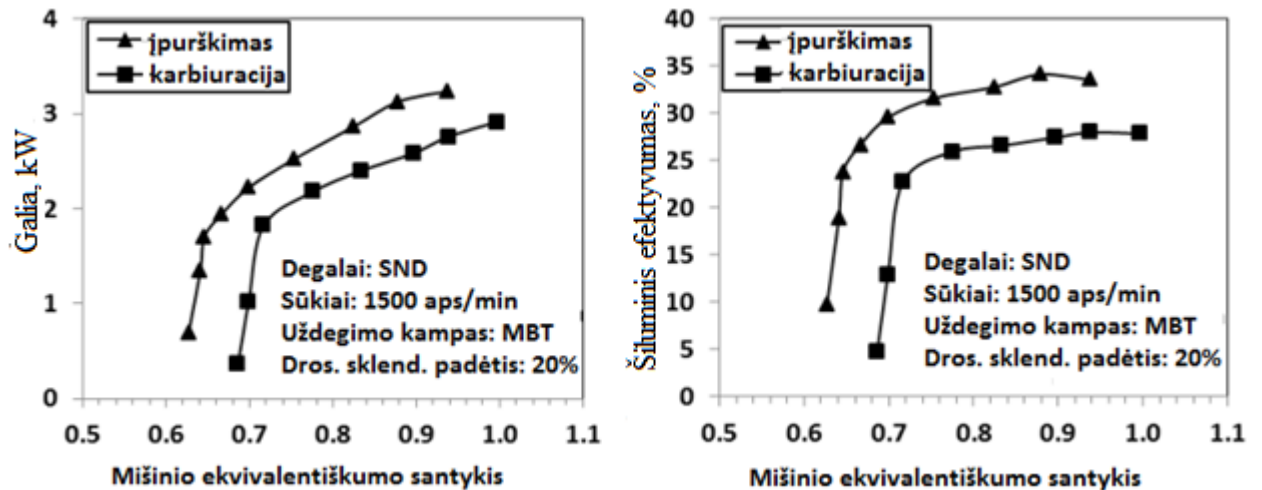
Senesniuose automobiliuose galima be jokių esamos degalų tiekimo sistemos perdarymo sumontuoti dujų tiekimo įrangą, kuri degalų tiekimą reguliuoja pagal slėgį variklio įsiurbimo kolektoriuje ir dujas tiekia per maišytuvą prieš variklio įsiurbimo kolektorių (pirmos kartos dujų įrangos sistema). Tokios sistemos buvo plačiai montuojamos ir vis dar yra montuojamos į automobilius, kurių varikliai naudojo mechaninį degalų įpurškimo valdymą. Tačiau tokios sistemos žymiai prastesnės emisijų, variklio efektyvumo ir degalų sąnaudų parametrais, nei sistemos, kurios dujas tiekia atskirai į kiekvieno cilindro įsiurbimo kanalą ir valdomos elektronikos.

Eksperimentinių tyrimų metu naudojant vieno cilindro, 0,66 litro darbinio tūrio variklį varomą SND (30% propanas, 70% butanas) J. Pradeep'as Bhasker'as ir E. Porpatham'as [4] palygino karbiuratorinį dujų tiekimą su tiekimu atskirai į kiekvieną įsiurbimo kanalą ir valdomu EVB. Autoriai galėjo keisti mišinio uždegimo laiką 1 laipsnio tikslumu nuo 0 iki 80 laipsnių alkūninio veleno pasisukimo kampo prieš stūmoklio viršutinį mirties tašką; degalų įpurškimo laiką 1 ms tikslumu, o testai buvo atliekami variklį apkrovus su dinamometriniu galios matavimo stendu palaikant fiksuotus 1500 aps/min variklio sūkius, fiksuotą 20% droselinės sklendės atidarymą; stabilią degalų bako temperatūrą; degimo paankstinimo kampą kiekvieno matavimo metu nustatant minimalų, kad būtų pasiektas didžiausias variklio sukimo momentas (angl. - minimum spark advance for best torque. Toliau - MBT). Eksperimento principinė schema pateikta 1 pav.



1 pav. Eksperimento schema. a – SND bakas 50°C vandenyje; b – kompensacinis SND bakas su elektriniais šildytuvais; c – SND valdymo vožtuvas; d – šiluminis srauto matuoklis; e – dujų purkštukai; f – oro srauto matuoklė; g – oro kolektorius; h – variklis; i – dinamometrinis galios matavimo stendas; j – stendo stabdys; k – stendo valdymo blokas; l – CH ir NO, NO_x analizatoriai; m – CO ir CO₂ analizatorius; n – slėgio cilindre jutiklis; o – alkūninio veleno padėties jutiklis; p – duomenų surinkimo sistema; q – stalinis kompiuteris; r – dujų įpurškimo EVB [4]

Pastebėta, kad variklio galia didesnė 24%, o efektyvumas – 22% naudojant dujų tiekimą tiesiogiai į įsiurbimo kanalą ir valdant dujų tiekimą su EVB (žr. 2 pav.). Tiksliai dozuojant degalus ir valdant jų įpurškimo laiką variklis sugebėjo naudoti degųjų mišinį, kuris buvo 8,6% liesnesnis, dėl to sumažėjo variklio degalų sąnaudos. Be to, maksimalus variklio efektyvumas užfiksuotas esant liesnesniam mišiniui, tai parodo geresnį tokios degalų tiekimo sistemos veikimą tiekiant į variklį liesnesnius degiuosius mišinius.

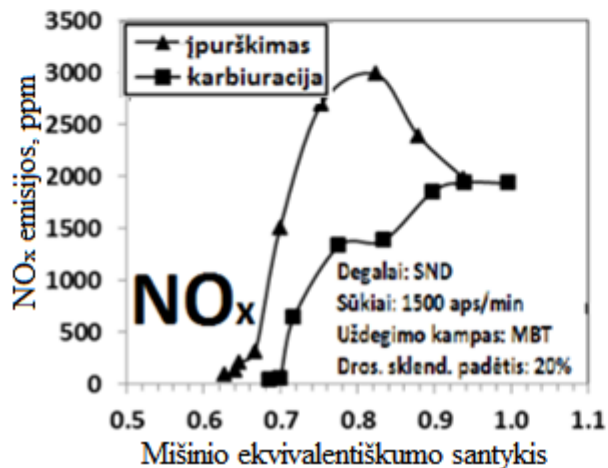
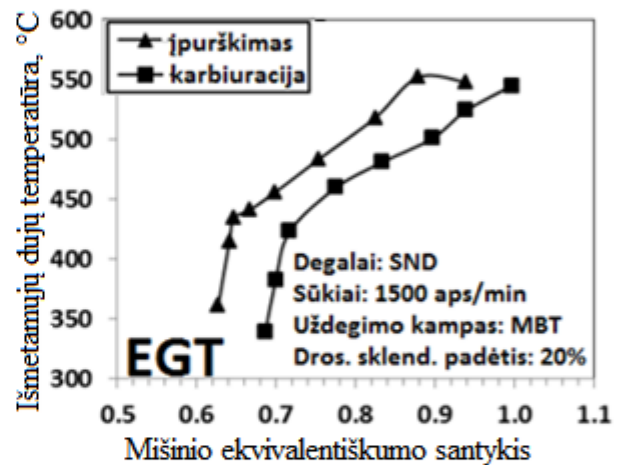
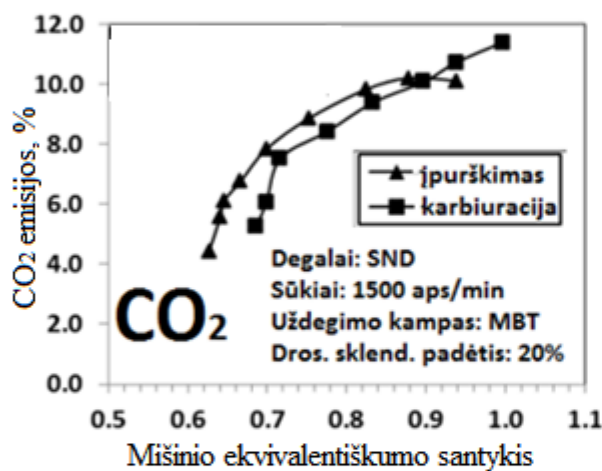
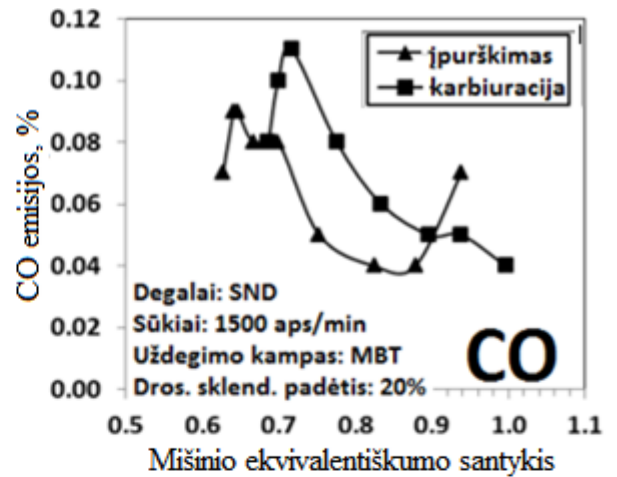
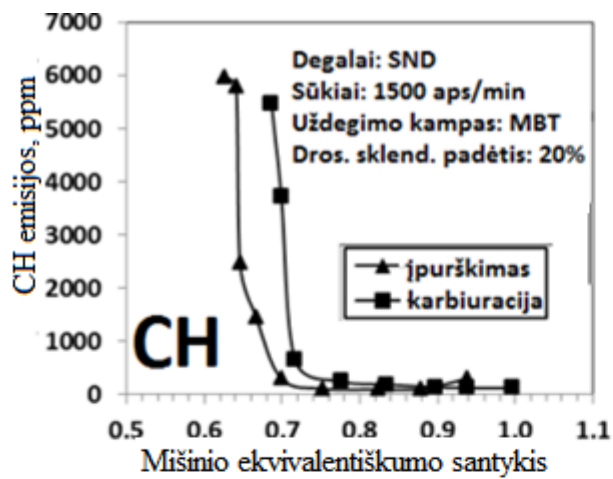


2 pav. Eksperimento metu gauti galios ir efektyvumo rezultatai [4]

CO ir CH emisijos liesinant mišinį mažėjo naudojant dujų įpurškimą iki ribos, kai mišinys buvo per liesas, kad stabiliai užsidegtu. CO₂ emisijos naudojant dujų įpurškimą nežymiai išaugo, dėl geriau vykstančio degimo proceso ir pilniau sudegančio mišinio; NO_x emisijos išaugo 58% (žr. 3 pav.) dėl padidėjusių mišinio degimo temperatūros, šilumos išsiskyrimo greičio ir geriau vykstančio degimo proceso – tai patvirtina pakilus išmetamųjų dujų temperatūra. Liesnesni mišiniai dega lėčiau nei stochiometriniai, todėl turi būti didinamas uždegimo paankstinimo kampas. Stechiometrinis mišinys dega žymiai greičiau, jam reikalingas mažesnis uždegimo paankstinimo, todėl kyla išmetamųjų dujų temperatūra.

NO_x emisijos didėja, kai variklis dirba liesais dujų mišiniais, nes mišinyje yra daugiau deguonies, kuris neturi galimybės sureaguoti su degalais ir aukštoje temperatūroje jungiasi su azotu. Aukšta degimo temperatūra (virš 1500 °C) smarkiai paspartina ore esančio azoto jungimąsi su deguonimi.

CO emisijos, priešingai nei NO_x, didėja esant deguonies trūkumui degimo metu, nes CO negali toliau oksiduotis iki CO₂.



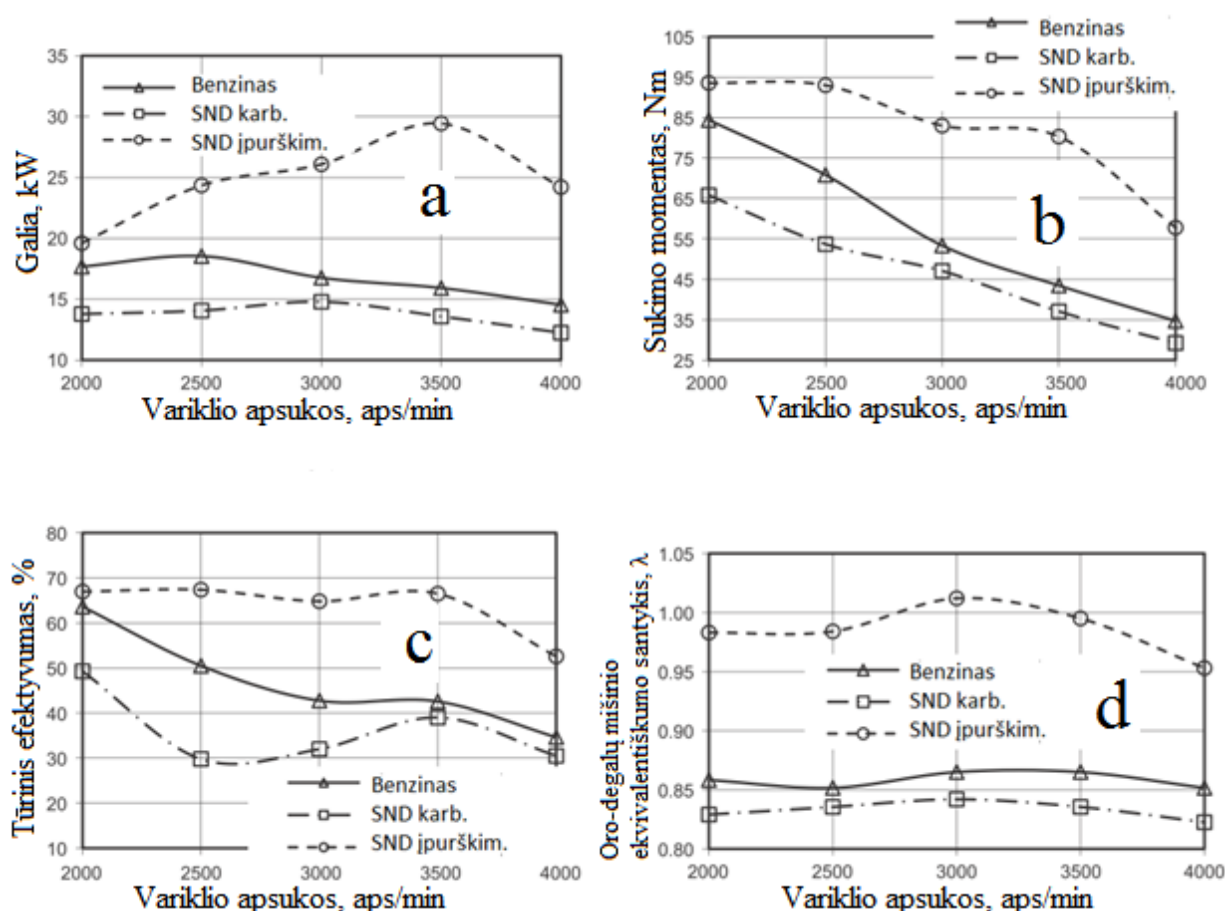
3 pav. Eksperimento metu gauti emisijų ir išmetamųjų dujų temperatūros rezultatai [4]

Kito tyrimo metu B. Erkus'as ir kiti autoriai lygino karbiuratorinį benzino, karbiurotarinį dujų (žr. 4 pav.) ir daugiataškį (dujos tiekiamos į kiekvieną įsiurbimo kanalą atskirai) dujų tiekimą su EVB [5]. Eksperimentams buvo naudojamas 1,6 litro darbinio tūrio keturių cilindrų variklis; fiksuotos 25% ir 50% droselinės sklendės atidarymo padėties; variklio sūkliai keičiami nuo 2000 iki 4000 aps/min; oro-

degalų ekvivalentiškumo santykis naudojant daugiataškį dujų tiekimą buvo išlaikomas 0,95 – 1,05 ribose, nes įprastai šiame intervale gaunami geriausi išmetamųjų dujų emisijų rezultatai.

Eksperimentas atliktas matuojant variklio darbo parametrus dirbant benzinu, karbiuratorinę dujų tiekimo sistemą ir daugiataškę dujų įpurškimo sistema. Eksperimento metu buvo palaikoma stabili aušinimo skysčio temperatūra - 81°C; EVB nebuvo fiksuojami dujų ir įsiurbimo kolektoriaus slėgiai, kadangi jie buvo žinomi kiekvieno testo metu; naudojamas dujų mišinys – 30% propanas, 70% butanas.

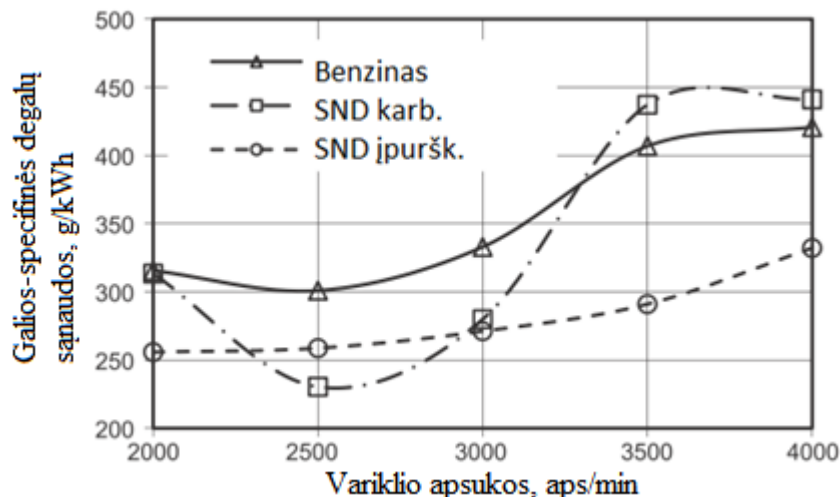
Gauti rezultatai visais atvejais buvo palankūs daugiataškiam dujų įpurškimui. Geriausi rezultatai gauti esant 25% droselinės sklendės atidarymui: 99,52% ir 84,84% variklio galios padidėjimas esant 3500 aps/min (žr.4 pav. a); ~28 Nm ir ~9 Nm maksimalaus sukimo momento padidėjimas esant 2000 aps/min (žr.4 pav. b); 61,46% ir 39,67% vidutinis tūrinio efektyvumo padidėjimas visame apsuoku diapazone (žr.4 pav. c) nei naudojant dujų ir benzino karbiuraciją atitinkamai. Variklio darbo metu naudotas vidutinis oro-degalų mišinio ekvivalentiškumo santykis: $\lambda=0,99$; $\lambda=0,86$; $\lambda=0,83$ (žr.4 pav. d) dujų įpurškimui, benzino karbiuracijai ir dujų karbiuracijai atitinkamai.



4 pav. Tyrimo rezultatai esant 25% droselinės sklendės atidarymui [5]

Galios-specifinės degalų sąnaudos (angl. brake-specific fuel consumption - BSFC) visame apsuoku diapazone vidutiniškai sumažėjo 20,65% ir 16,35% nei naudojant dujų ir benzino karbiuraciją atitinkamai (žr.5 pav.).

Autoriai pabrėžia, kad lyginant sistemas buvo nevienodos sąlygos, kadangi benzino karbiuratoriaus venturi sudaro papildomą slėgio kritimą ir dėl to sumažėjusį absoliutinį slėgį įsiurbimo kolektoriuje ir variklio tūrinį efektyvumą. Didesnis droselinės sklendės atidarymas mažina šį efektą ir testų rezultatai su 50% sklendės atidarymu neturėjo tokio didelio rezultatų skirtumo tarp skirtingų kuro tiekimo sistemų, nors dujų įpurškimo sistema su EVB vis vien pasirodė ženkliai geriau.



5 pav. Galios-specifinės degalų sąnaudos esant 25% droselinės sklendės atidarymui (dujų karbiuracija dirbo nestabiliai esant 2500aps/min) [5]

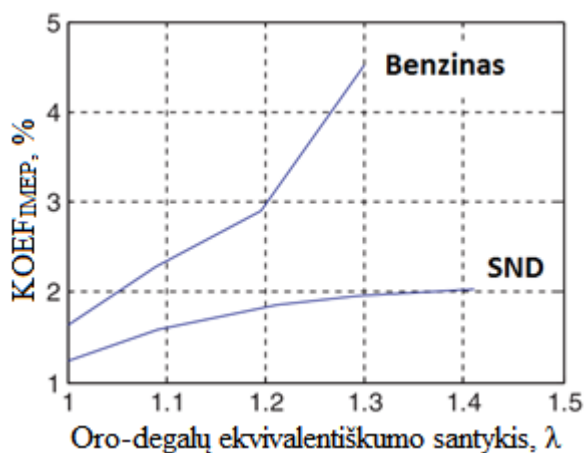
Bandymo sąlygos esant 25% droselinės sklendės atidarymui ir 2000 – 4000 aps/min apskoms ganėtinai atitinka automobilio važiavimą užmiestyje, kadangi tokiomis sąlygomis įprastai būna panašūs variklio sūkių ir droselinės sklendės atidarymo reikalavimai. Oro-degalų mišinio ekvivalentiškumo santykio išlaikymas kuo arčiau $\lambda = 1.0$ užtikrina geriausią degalų sudegimą.

Kito tyrimo metu autoriai M.A. Ceviz'as ir F. Yuksel'as [6] lygino ciklinį mišinio degimo stabilumą varikliui dirbant benzinu ir SND naudojant liesus mišinius. Eksperimentu metu buvo išlaikomi 1800(+15) aps/min variklio sūkliai; degimo paankstinimo kampas – MBT; pilnai atidaryta droselinė oro sklendė. Dirbant benzinu buvo naudojami mišiniai $\lambda=1,001$; $\lambda=1,090$; $\lambda=1,195$ ir $\lambda=1,299$; dirbant SND - $\lambda=1,000$; $\lambda=1,092$; $\lambda=1,212$; $\lambda=1,293$ ir $\lambda=1,410$. Bandant benzinu naudoti mišinius liesesnius nei $\sim \lambda = 1,3$ variklis nebesugebėjo stabiliai uždegti degalų/oro mišinio.

Stabiliausias variklio darbas pasiekiamas, kai yra didžiausias mišinio laminarinis degimo greitis. Laminarinis degimo greitis priklauso nuo degiojo mišinio oro-degalų santykio ir yra didžiausias esant stochiometriniam arba šiek tiek riebiam mišiniui. Bet koks ženklus nukrypimas nuo stochiometrinio mišinio mažina laminarinį degimo greitį ir didina uždegimo uždelsimo laiką, o tai didina ciklinius mišinio degimo skirtumus. Esant dideliems mišinio degimo skirtumams tarp variklio darbo ciklų, kai dirbama kraštutinai liesu mišiniu, mišinys gali nebeužsidegti, atsirasti uždegimo pertrūkiai, padidėja CH emisijos ir automobilis apskritai gali tapti sunkiau eksploatuojamas.

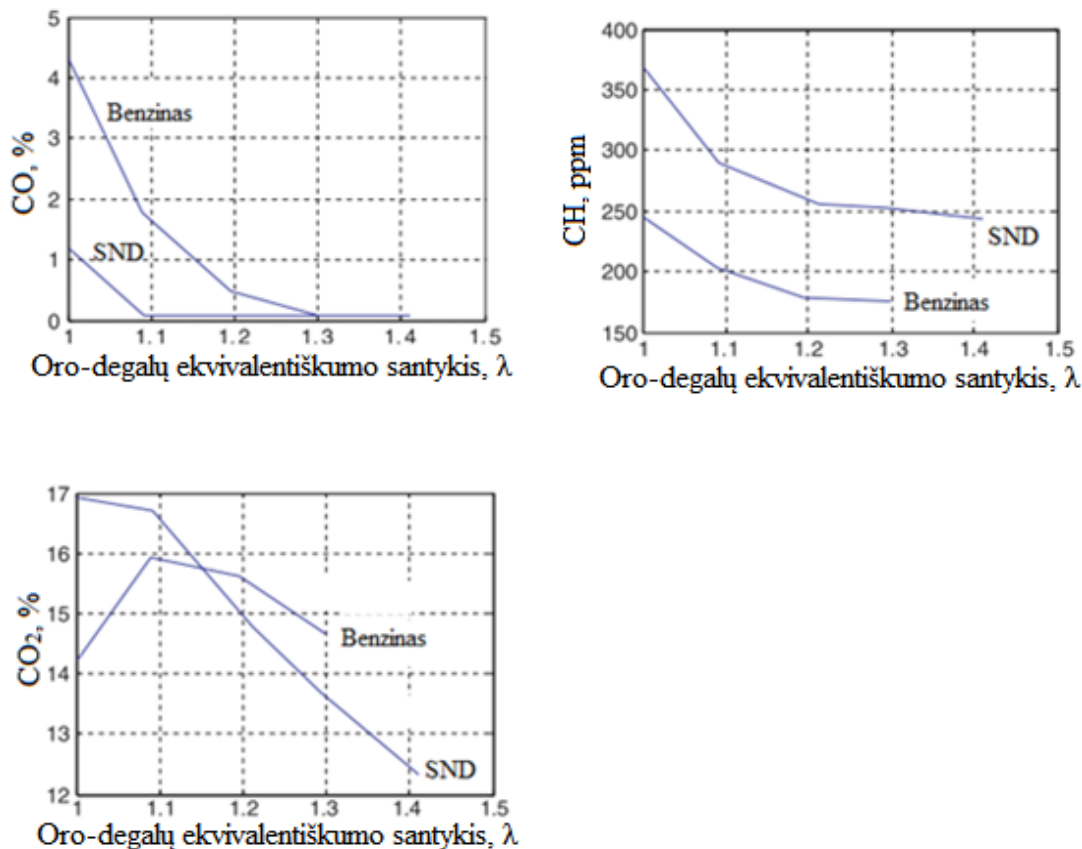
Liesas degimas naudojant SND yra naudingas norint sumažinti CH ir NO_x emisijas bei variklio degalų sąnaudas ir SND yra labiau tinkami degalai už benziną šiam tikslui pasiekti dėl didesnio laminarinio degimo greičio.

Autoriai pastebėjo, kad, liesinant degųjų mišinį, didėja variacijos koeficientas tarp vidutinio slėgio veikiančio stūmoklį variklio darbo metu (angl. indicated mean effective pressure arba IMEP), o tai parodo didėjantį variklio darbo nestabilumą. Naudojant SND šis variacijos koeficientas buvo mažesnis (žr.6 pav.).



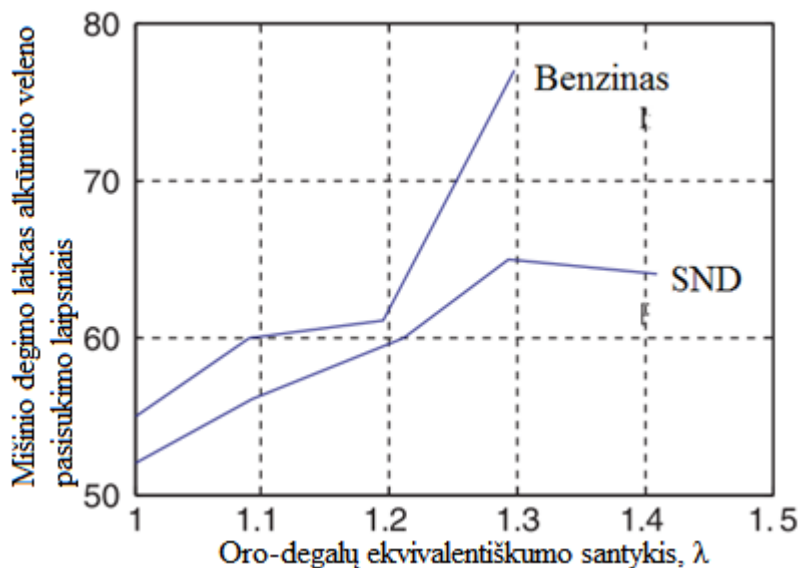
6 pav. Vidutinio stūmoklį veikiančio slėgio kitimo priklausomybe nuo oro-degalų santykio ir degalų rūšies [6]

Kintantis degusis mišinys taip pat turėjo įtaką variklio CO, CO₂ ir CH emisijoms. Jos mažėjo liesinant mišinį mažėjo (žr.7 pav.). Liesesnis mišinys ir SND sudėtyje esantis mažesnis anglies atomų kiekis padėjo sumažinti CO₂ emisijas.



7 pav. CO, CO₂ ir CH emisijų priklausomybe nuo mišinio liesumo ir degalų rūšies [6]

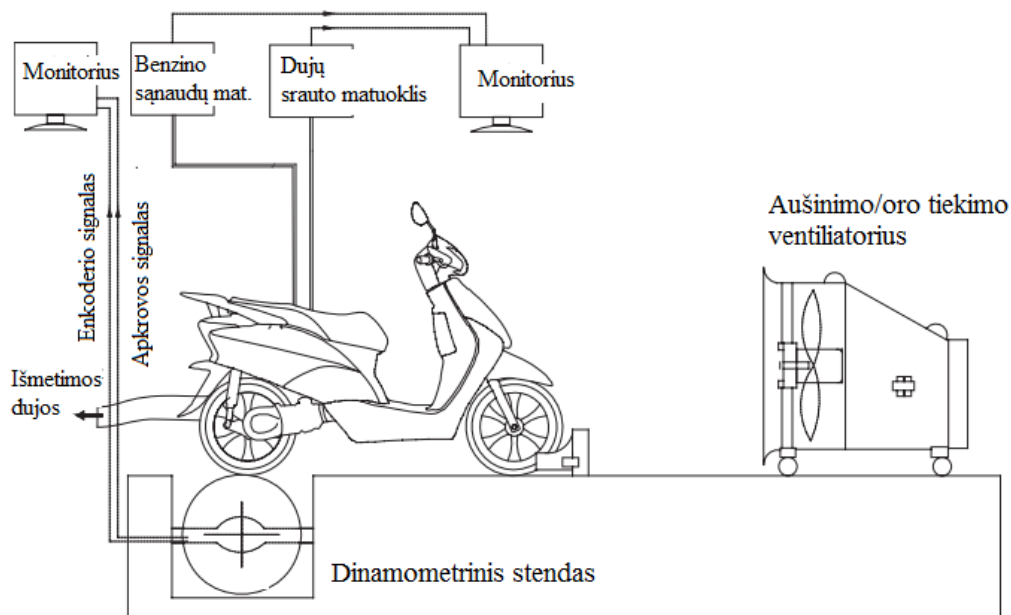
Liesas mišinys sumažina liepsnos plitimo greitį ir padidina bendrą mišinio degimo laiką (žr.8 pav.). Ilgesnis degimo laikas leidžia didesniai šilumos kiekiui būti perduotam į variklio cilindro sieneles, o tai mažina variklio šiluminį efektyvumą. Padidėjęs mišinio degimo laikas reikalauja paankstinti mišinio uždegimą, tačiau naudojant SND mišinio uždegimą ankstinti reikia mažiau nei naudojant benzina dėl didesnio SND laminarinio degimo greičio.



8 pav. Degimo laiko priklausomybė nuo mišinio liesumo ir degalų rūšies [6]

Vienas svarbiausių nepageidaujamų efektų naudojant SND yra variklio galios sumažėjimas dėl tūrinio efektyvumo sumažėjimo. Sudarant degųjų mišinį, dujos užima dalį įsiurbiamo oro vietos, todėl kiekvieno variklio ciklo metu įsiurbiamas mažesnis oro kiekis, o tai sumažina ir kuro, kurį įmanoma sudeginti kiekvieno ciklo metu, kiekį, dėl to sumažėja variklio galia.

Tyrimo metu, pasitelkiant kompiuterines simuliacijas ir pritaikant motorolerį dirbti SND, autoriai K. N. Duc'as ir V. N. Duy'as įvertino variklio galią, emisijas ir degalų sąnaudas naudojant benzino ir daugiataškio dujų tiekimo sistemas [7]. Testams autoriai naudojo savos gamybos dujų įpurškimo EVB, kuris įpurškiamų degalų kiekį apskaičiavo naudojant motorolerio oro droselinės sklendės padėties jutiklį (angl. throttle position sensor. Toliau - TPS), alkūninio veleno padėties jutiklį; aušinimo skysčio temperatūros jutiklį ir papildomą dujų slėgio jutiklį, tačiau galutinis dujų purkštukų atidarymo laikas ir įpurškiamų dujų slėgis buvo koreguojamas rankiniu būdu, kad geriausiai atitiktų variklio darbo sąlygas. Eksperimentų metu ant dinamometrinio stendo naudotas benzinas RON 92 ir SND susidedančios iš 50% propano ir 50% butano.

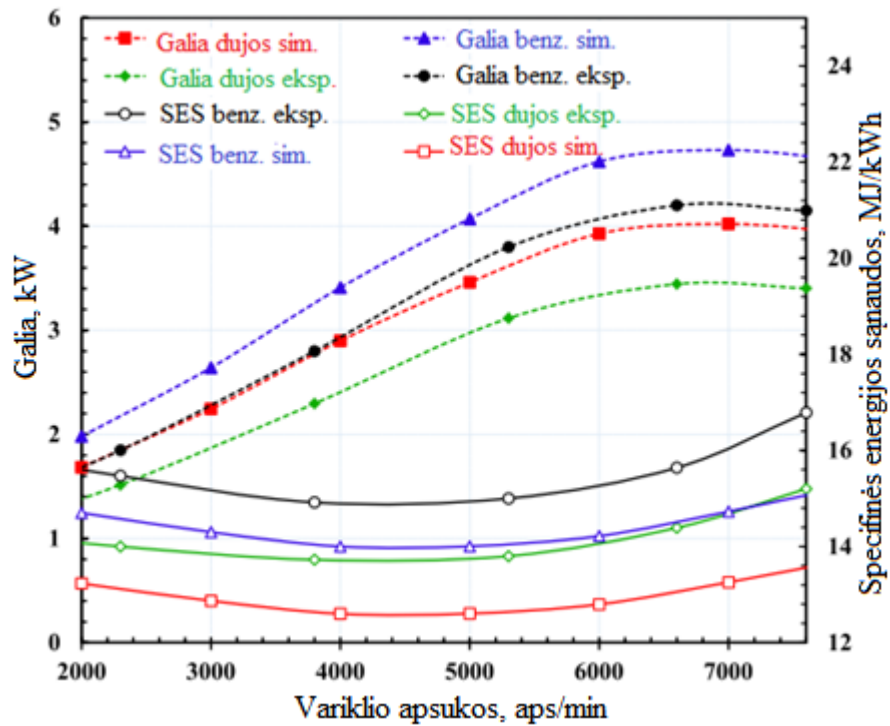


9 pav. Eksperimento ant dinamometrinio stendo schema [7]

Simuliacijoms naudoti parametrai: variklio apskukos 2000-8000 aps/min; pilnai atidaryta oro droselinė sklendė ir stochiometrinis mišinys abiem degalų rūšims.

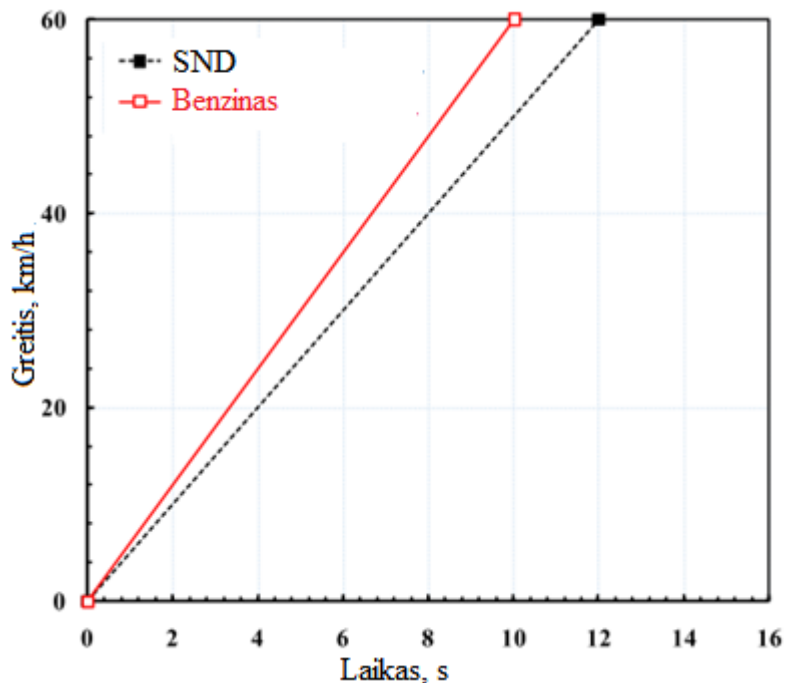
Testų ant dinamometrinio stendo metu buvo keičiamas motorolerio greitis nuo 10 iki 70km/h ir laikoma pilnai atidaryta droselinė sklendė. Degalų sąnaudos pamatuotos išlaikant vienodą motorolerio greitį ir nuvažiuotą atstumą. Be to išbandytas motorolerio išibėgėjimas realiomis sąlygomis.

Tyrimo metu gauti rezultatai parodė, kad variklio galia naudojant SND vidutiniškai buvo 15-18% mažesnė nei naudojant benzina (žr.10 pav.), tai paaiškinama tuo, jog dujiniai degalai užima dalį įsiurbiamo oro tūrio. Specifinės energijos sąnaudos (angl. specific energy consumption arba SEC) naudojant SND sumažėjo iki 10% dėl geresnio degiojo mišinio formavimosi ir geresnio mišinio degimo proceso naudojant dujinius degalus. Didelis skirtumas tarp simuliacijos ir dinamometrinio stendo bandymų paaiškinamas tuo, kad simuliacijoms padaryta prielaidų, kad supaprastinti skaičiavimus. Tačiau bendra rezultatų tendencija išlieka tokia pat.



10 pav. Simuliacijos ir dinamometrinio stendo eksperimentų rezultatų palyginimas [7]

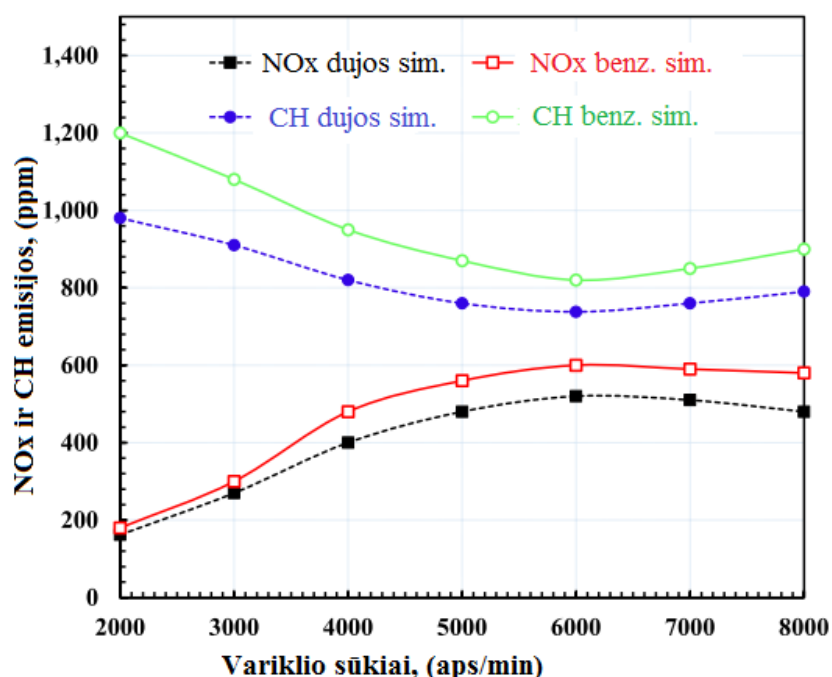
Įsibėgėjimo bandymuose pastebėtas 20% prastesnis rezultatas naudojant SND dėl sumažėjusios variklio galios (žr.11 pav.).



11 pav. Įsibėgėjimo bandymų rezultatai [7]

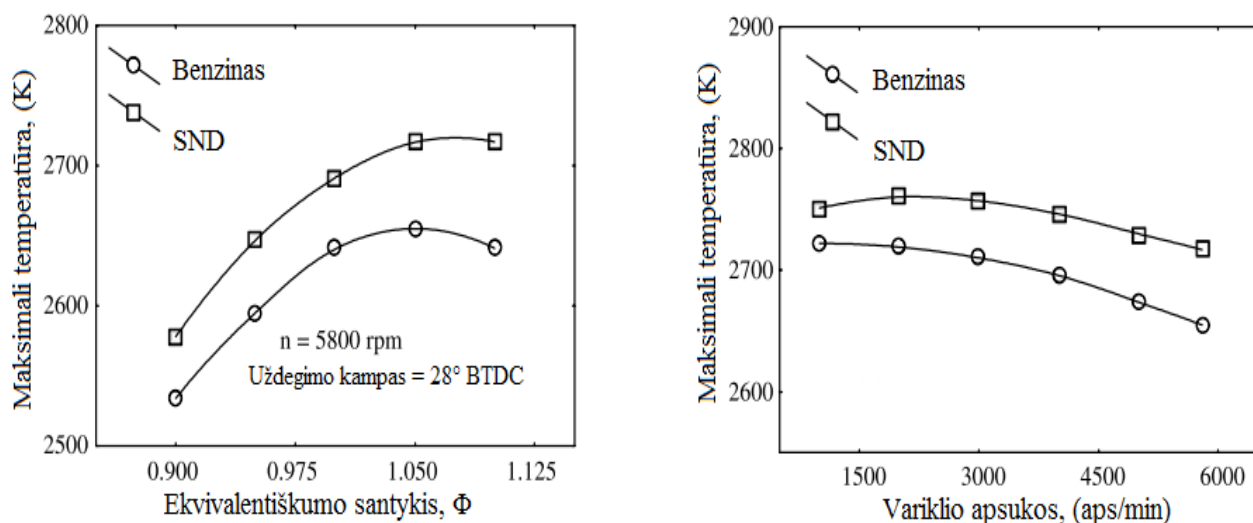
Gauti emisijų rezultatai buvo palankūs SND, tai autoriai taip pat paaškina geresniu mišinio susidarymu ir geresniu degimo procesu naudojant dujinius degalus bei mažesniu anglies-vandenilio

santykiu nei benzino ir mažesne nei benzino tūrinės kaitros (angl. volumetric heating value) reikšme. CO emisijos sumažėjo 61,9%; CH – 13,3%; NO_x – 14,9% (žr.12 pav.).



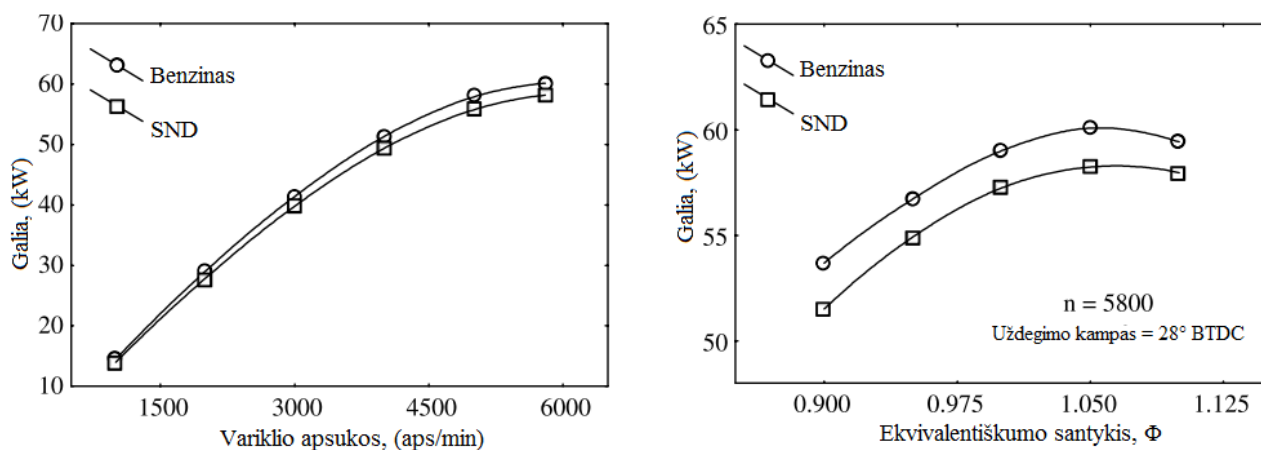
12 pav. Simuliacijos metu gauti emisijų rezultatai [7]

Naudojant matematinį kibirkštinio uždegimo variklio modelį, autoriai H. Bayraktar'as ir O. Durgun'as [8] savo tyrime lygino variklio darbo parametrus naudojant SND (100% propanas) ir benzina. Matematinio modelio tinkamumas ir tikslumas buvo patvirtintas lyginant teorinius rezultatus su eksperimentiniais rezultatais iš kitų tyrimų. Tyrimo metu autoriai naudojo uždegimo kampo ankstinimą nuo 12 iki 28 laipsnių prieš viršutinį mirties tašką (angl. before top dead centre. Toliau - BTDC); variklio apsuksas nuo 1000 iki 5800 aps/min. Gauti rezultatai yra 1,5-16% didesnė temperatūra cilindre esant tam pačiam mišinio ekvivalentiškumo santykiui ir 8-39% didesnė keičiant mišinį nuo 0,9 iki 1,1 ekvivalentiškumo santykio (žr.13 pav.).



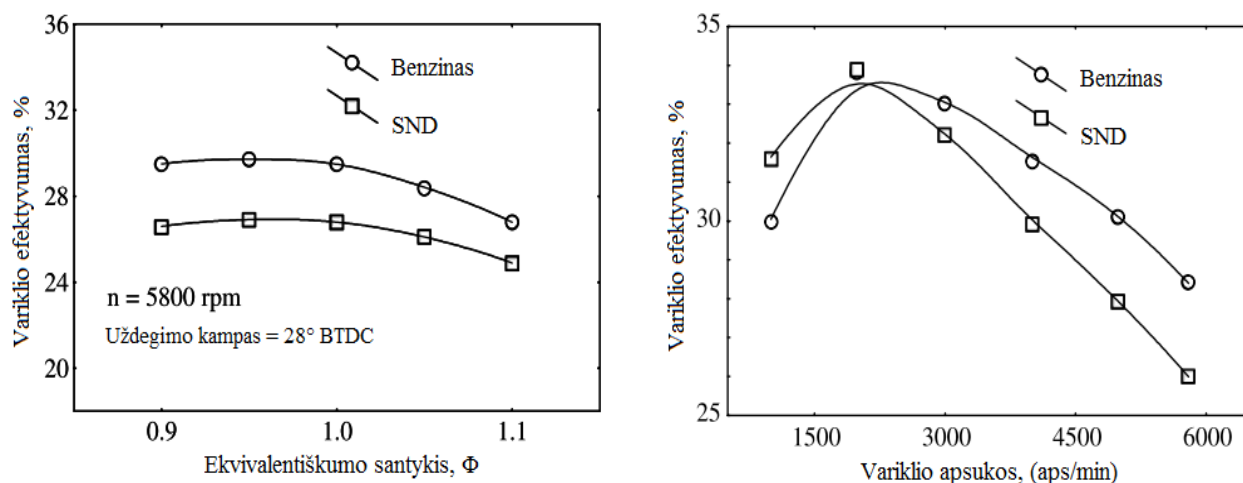
13 pav. Maksimalios temperatūros cilindre palyginimas [8]

Variklio galia sumažėjo 2,44-4% naudojant SND esant vienodam degiajam mišiniui ir keičiant variklio apsukas (žr.14 pav.). Panašų galios sumažėjimą savo tyrime pastebėjo M. Y. Sulaiman'as ir kiti autoriai [9]. Naudojant karbiuratorinį 0,15 litro darbinio tūrio vieno cilindro variklį; esant maksimaliam variklio sukimo momentui testų metu; ir nekeičiant uždegimo kampo variklio galia sumažėja 4% naudojant SND lyginant su benzinu.



14 pav. Variklio galios palyginimas [8]

Variklio galios sumažėjimą autoriai paaiškina sumažėjusiu tūriniu efektyvumu (žr.15 pav.).



15 pav. Variklio efektyvumo palyginimas [8]

CO emisijos sumažėjo nuo 4 iki 30% dirbant įvairiais apsukų ir degiojo mišinio režimais; NO emisijos sumažėjo nuo 4,3 iki 50%.

Autoriai šiame darbe padarė išvadas, kad išlaikant tą patį degalų/oro mišinį, didesnis SND degimo greitis nulėmė didesnius cilindro slėgius ir temperatūras nei naudojant benzina; SND sumažina variklio tūrinį efektyvumą ir dėl to variklio galią; sumažėjęs tūrinis efektyvumas sumažina variklio efektyvumą ir dėl to padidina degalų sąnaudas.

S. Mockus, J. Sapragonas ir kiti autoriai savo darbe [10] tyrė automobilio išmetamąsias dujas naudojant gamybinę benzino karbiuracijos sistemą ir pirmos kartos SND įrangą sureguliuotą pasiekti didžiausią variklio arba mažiausias žalingas emisijas išmetamosiose dujose. Tyrimas buvo atliktas

naudojant dinamometrinių galios matavimo stendą ir buvo matuojamos CO, CO₂ ir CH emisijos esant skirtingiems automobilio važiavimo scenarijams. Pastebėta, kad pirmos kartos SND sistemose oro-degalų santykis labai smarkiai svyruoja keičiantis variklio apkrovai lyginant su gamykinę benzino tiekimo sistema. CO₂ emisijos buvo mažesnės nei naudojant benzina, kai SND tiekimo sistema sureguliuota maksimaliai galiai, ir panašios į benzino, kai sistema sureguliuota pasiekti mažiausias emisijas. CO ir CH emisijos abiem atvejais buvo didesnes nei naudojant benzina, ypač, kai SND tiekimo sistema sureguliuota pasiekti maksimaliai variklio galiai. Pabrėžiamas didelis SND tiekimo sistemos inertiškumas, kai, pasikeitus variklio apkrovai, prirėikė iki 10 sekundžių, kad sistema pasiektų stabilią būseną.

Skirtingos SND tiekimo sistemos yra analizuojamos L. Raslavičiaus, A. Keršio ir kitų autorių darbe [11], kur taip pat pabrėžiami pirmos kartos SND tiekimo sistemos trūkumai. Siekiant mažesnių degalų sąnaudų, dažnai tokios sistemos veikia per liesu oro-degalų mišiniu, ypač esant didesniems variklio sūkiams. Dėl to atsiranda mišinio uždegimo problemos, uždegto mišinio užgesimas ir nepilnas sudegimas – tai pagrindinės smarkiai padidėjusių žalingų emisijų priežastys. Variklio darbo parametrai priklausomi tik nuo pradinio sistemos suregulioavimo ir vartotojo poreikių.

Šių darbų analizė parodė, kad, pritaikius variklį naudoti SND, sumažėja variklio tūrinis efektyvumas ir galia dėl to, kad dujinės formos degalai užimà dalį variklio įsiurbiamo oro; žalingos išmetamųjų dujų emisijos paprastai yra mažesnės, dėl geresnio degiojo mišinio sudarymo ir cheminių SND savybių, tačiau yra priklausomos nuo variklio savybių ir darbo parametrų; pasiekiamos mažesnes santykinės degalų sąnaudos dėl didesnės SND energinės vertės. Visais atvejais dujų tiekimas atskirai į kiekvieną įsiurbimo kanalą (4-os kartos SND tiekimo sistema) yra pranašesnis už dujų karbiuraciją (1-os kartos SND sistema) dėl galimybės nuolatos tiksliai kontroliuoti degalų tiekimo parametrus.

2. Suskystintų naftos dujų tiekimo sistemos

Suskystintos naftos dujos yra plačiai naudojami degalai automobiliuose dėl savo efektyvaus ir švaresnio degimo [12] bei mažesnės kainos nei benzinas. SND suskystinamos pakankamai žemu slėgiu (7-8 atm. priklausomai nuo tikslios sudėties) lyginant su gamtinėmis dujomis, kurios suspaudžiamos ~200 atm. slėgiu, o suskystinamos atšaldant iki -162 °C. Galimybė lengvai suskystinti, smarkiai palengvina SND panaudojimą, kadangi nereikia sunkių degalų bakų iš storasienio metalo, kurie išlaikytų didelį slėgį, ir kyla mažesnis pavojus pažeidus degalų baką. SND susideda iš propano ir butano. Propano/butano santykis priklauso nuo rinkos, kuriai yra tiekiamas, metų laiko ir klasės. Santykis gali keistis nuo gryno propano iki gryno butano [13]. Pateikti kelių Europos šalių naudojami dujų mišiniai ir klasės (žr.1-2 lent.).

1 lentelė. Dažniausiai naudojami SND mišiniai skirtingose šalyse [13]

Šalys	SND klasė	Pateiktas propano/butano santykis
Austrija	A	nuo 100%/0% iki 80%/20%
Belgija	A	60%/40% visus metus
Čekija	A-C	60%/40% žiemą, 40%/60% vasarą
Danija	A	70%/30% nuo 1/09 iki 31/05
Suomija	A	95%/5% nuo 1/09 iki 31/05
Prancūzija	A-C	A klasė nuo 1/11 iki 31/03, C klasė vasarą
Vokietija	A-E	B klasė nuo 01/12 iki 31/03, E klasė vasarą
Vengrija	C	40%/60% visus metus
Airija	A	100%/0% visus metus
Italija	A-C, D-E	nuo 90%/10% iki 20%/80% nuo 1/11 iki 31/03, D arba E klasė vasarą
Lenkija	A-D	A klasė nuo 1/11 iki 31/03, D klasė vasarą
Portugalija	A	92%/8%
Slovėnija	C	35%/65%
Ispanija	C	35%/65% nuo 1/11 iki 31/03
Turkija	B	50%/50% nuo 1/11 iki 31/03, 30%/70% vasarą
Jungtinės Karalystės	A	100%/0% visus metus

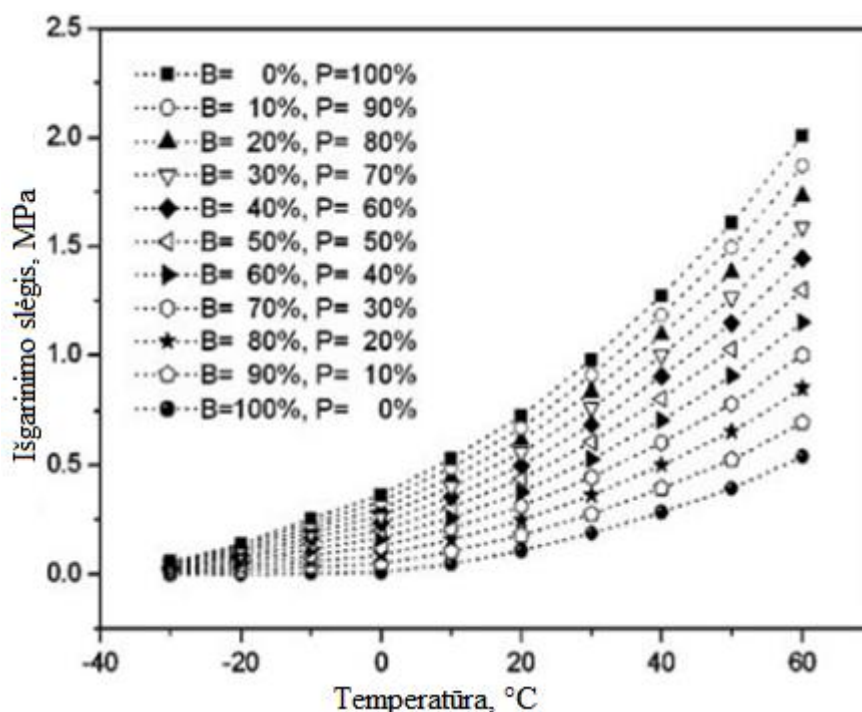
2 lentelė. SND klasės [13]

SND klasė	Temperatūra	Galimi propano/butano santykiai
A	-10°C	nuo 100%/0% iki 60%/40%
B	-5°C	nuo 60%/40% iki 40%/60%
C	0°C	nuo 40%/60% iki 30%/70%
D	+10°C	nuo 30%/70% iki 10%/90%
E	+20°C	nuo 10%/90% iki 0%/100%

Skirtingos SND klasės reikalingos, kad geriau pritaikyti degalų sudėtį pagal tai, kokiame klimato jė naudojami. Propanas turi žemesnį virimo tašką ir yra tinkamesnis šaltoms klimato sąlygoms, grynas propanas verda esant $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$, o butanas $-0\text{ }^{\circ}\text{C}$ esant atmosferiniam slėgiui. SND klasių sudėtis sudaryta taip, kad, esant nurodytai temperatūrai, dujų slėgis būtų mažiausiai 1,5 atm.

Viena iš pagrindinių problemų naudojant SND yra jų išgarinimas (pirmos-ketvirtos kartos SND sistemose), SND virsta dujomis mažinant jų slėgį ir verdant. Tam, kad vyktų virimo procesas, reikalinga šiluma, ji automobilių SND tiekimo sistemose gaunama dujų reduktoriuje-garintuve iš automobilio aušinimo sistemos skysčio. Nešildant reduktoriaus-garintuvo aušinimo skysčių, jo temperatūra labai greitai greit nukristų žemiau SND virimo temperatūros ir dujų išgarinimas taptų per mažas, kad palaikyti pakankamą dujų slėgį sistemoje.

Kita problema - išgarinimo slėgio priklausomybė nuo SND sudėties ir temperatūros (žr. 16 pav.). Keičiantis dujų išgarinimo slėgiui keičiasi į variklį patenkančių dujų kiekis esant toms pačioms dujų tiekimo sąlygoms.



16 pav. Dujų slėgio priklausomybė nuo temperatūros ir propano/butano santykio [12]

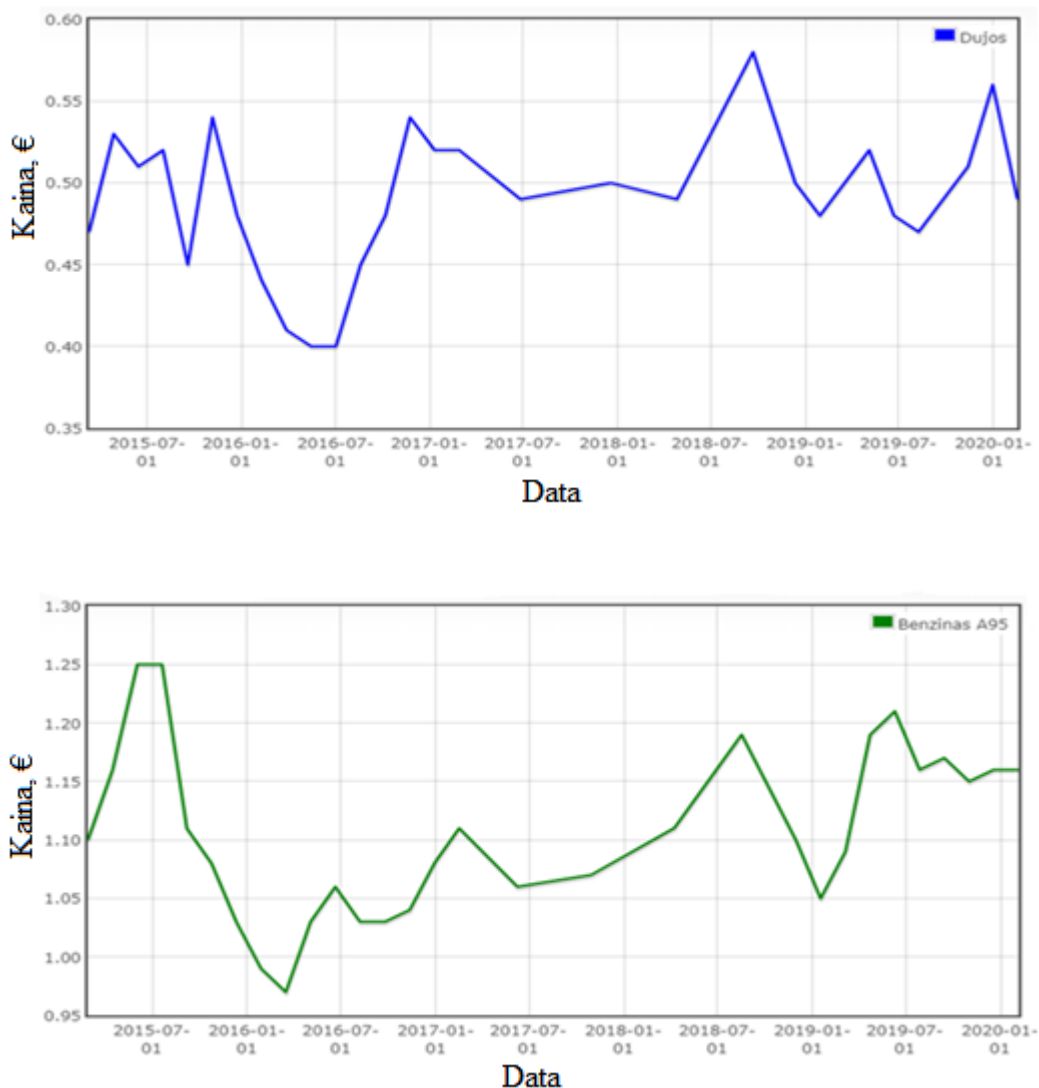
SND privalumai yra didesnis už benzino oktaninis skaičius, aukštesnę savaiminio užsiliepsnojimo temperatūra, didesnis liepsnos plitimo greitis uždegus degalus ir platesnės užsiliepsnojimo ribos (žr. 3 lent.). Šios teigiamos savybės daro SND patrauklesniais degalais už benzina [14].

3 lentelė. SND ir benzino savybės [15-17]

Savybė	SND	95 benzinas
Cheminė sudėtis	x% C ₃ H ₈ ; x% C ₄ H ₁₀	C ₇ H ₁₅
Okataninis skaičius, RON	94 -112	95
Savaiminio užsiliepsnojimo temperatūra, °C	410 - 550	257
Liepsnos plitimo greitis, cm/s	~0,40	0,375

Savybė	SND	95 benzinas
Užsilepsnojimo ribos ore, % tūrio	1,5 - 9,5	1,4 - 7,6
Tankis, kg/m ³ (15°C)	510-600 (skyst.)	735

Dar vienas argumentas naudoti SND yra kaina. SND visuomet maždaug du kartus pigesnės už litrą degalų nei benzinas (žr. 17 pav.), todėl net esant didesniai degalų suvartojimui (paprastai 10-20%) SND yra patrauklesni degalai finansiškai.



17 pav. Benzino ir SND kainų statistika [18]

2.1. Pirmos kartos sistema

Tai visiškai mechanine dujų tiekimo sistema, reguliuojama rankiniu būdu, neturinti jokio atgalinio ryšio degalų tiekimo procese ir nepertraukiamai tiekianti dujas į variklį. Šios sistemos pagrindiniai elementai yra reduktorius-garintuvas, kuris reikalingas išgarinti SND ir sumažinti jų slėgį; dujų srauto reguliavimo vožtuvas, naudojamas riboti maksimalų į variklį patenkantį dujų srautą; dujų maišytuvas, kuris, naudojant venturi efektą, siurbia dujas iš reduktoriaus-garintuvo ir sudaro degųjų mišinį įsiurbimo kolektoriuje dujas sumaišydamas su oru (žr. 18 pav.). Tokios sistemos privalumai yra:

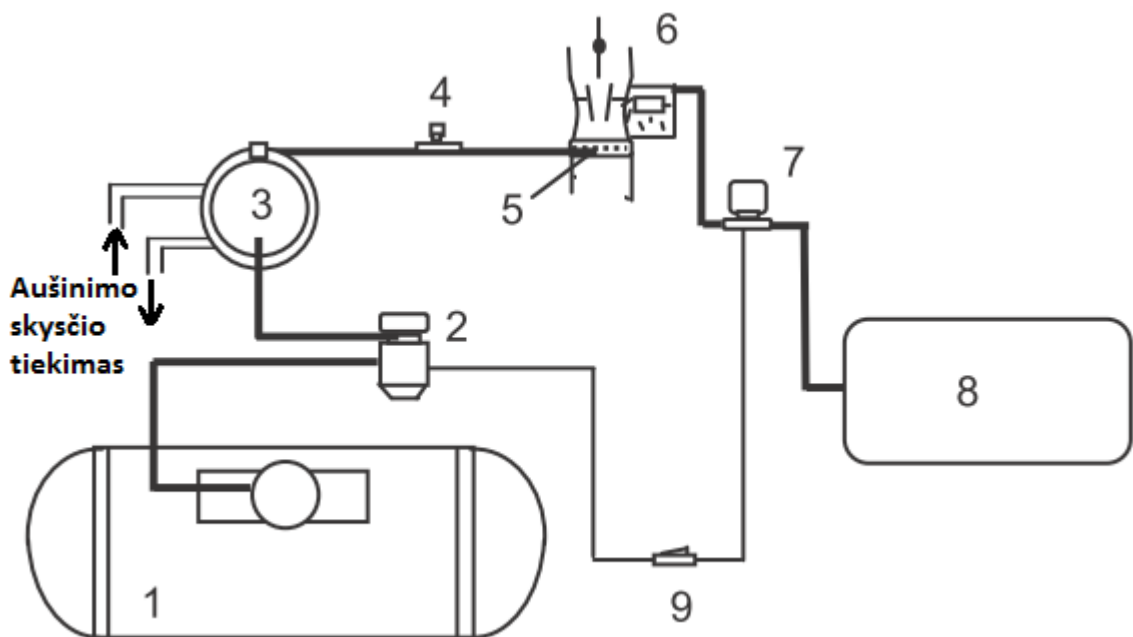
- žema kaina;

- montavimo ir aptarnavimo paprastumas
- galimybė pritaikyti daugeliui automobilių

Trūkumai:

- degusis mišinys reguliuojamas rankiniu būdu ir nėra sistemos pritaikomas kintančioms variklio darbo sąlygoms;
- degiojo mišinio priklausomybė nuo reduktoriaus-garintuvo temperatūros;
- degiojo mišinio priklausomybė nuo reduktoriaus-garintuvo guminių membranų susidėvėjimo;
- degiojo mišinio priklausomybė nuo SND savybių;
- degusis mišinys sudaromas prieš oro įsiurbimo kolektorių ir visas kolektorius juo užpildomas, dėl to sistema negali reaguoti į pereinamuosius variklio darbo procesus;
- degiojo mišinio užsiliepsnojimo įsiurbimo kolektoriuje pavojus esant netvarkingai arba neteisingai sureguliuotai variklio uždegimo sistemai;
- degalų rūšies perjungimas iš SND į benzinaž turi būti uždelstas, kol bus išdegintos visos dujos, sukauptos įsiurbimo trakte;
- dujų maišytuvus sudaro papildomą pasipriešinimą įsiurbimo trakte ir mažina variklio efektyvumą;
- sistema turi būti dažnai sureguliuojama iš naujo

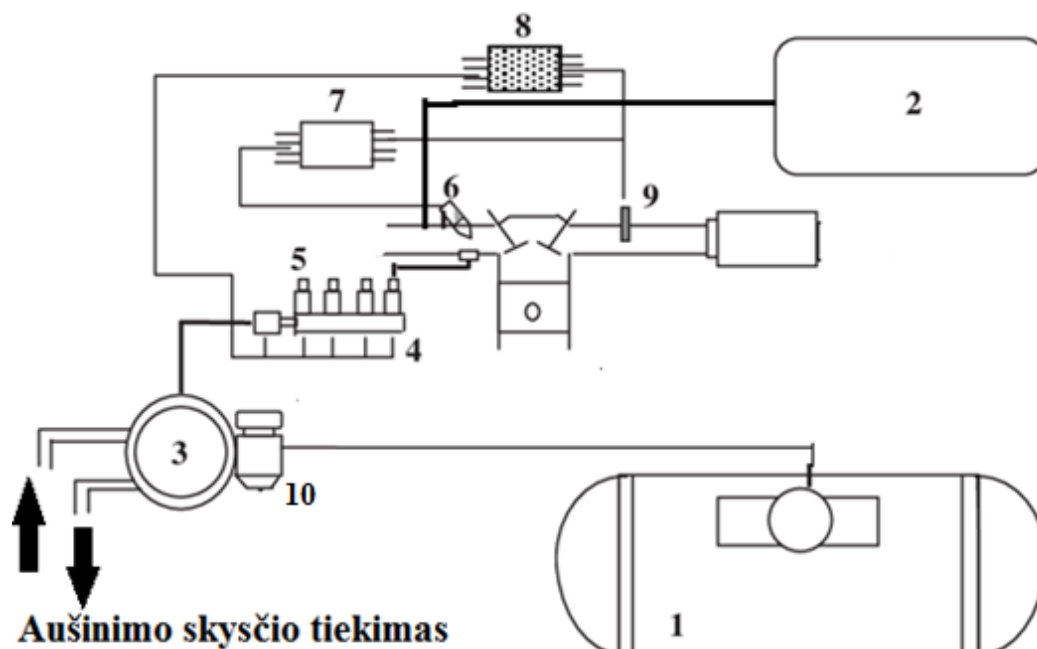
Ši SND tiekimo sistema yra visiškai nepriklausoma nuo gamyklinės automobilio degalų tiekimo sistemos ir gali būti sumontuota bet kokiam kibirkštinio uždegimo varikliui, parenkant tinkamus sistemos komponentus.



18 pav. Pirmos kartos dujų tiekimo schema. 1 – SND bakas; 2 – SND tiekimo vožtuvas; 3 – SND reduktorius-garintuvas; 4 – rankinis dujų srauto reguliavimo vožtuvas; 5 – dujų maišytuvas; 6 – benzino tiekimo sistema; 7 – benzino tiekimo vožtuvas; 8 – benzino bakas; 9 – degalų rūšies perjungiklis [26]

2.2. Ketvirtos kartos sistema

Tai pilnai elektronikos valdoma sistema, kuri veikia naudodama automobilio benzino purkštukų signalus ir pritaikydama papildomas korekcijas, kad valdyti elektromagnetinius dujų purkštukus. Sistemos principinė schema pavaizduota 19 pav.



19 pav. Ketvirtos kartos dujų tiekimo schema. 1 - SND bakas; 2 – benzino bakas; 3 – SND reduktorius-garintuvas su temperatūros jutikliu; 4 – dujų slėgio ir temperatūros jutikliai; 5 – dujų purkštukai; 6 – benzino purkštukai; 7 – benzino tiekimo EVB; 8 – dujų tiekimo EVB; 9 – deguonies jutiklis; 10 – SND elektromagnetinis vožtuvas [26]

Pagrindiniai sistemos komponentai yra reduktorius-garintuvas, kuris išgarina dujas ir palaiko apytikslią išgarintų dujų slėgį sistemoje; elektromagnetiniai dujų purkštukai, kurie tiekia dujas prieš pat oro įsiurbimo vožtuvus; dujų slėgio ir temperatūros jutikliai, reikalingi EVB apskaičiuoti purkštukų atidarymo laiko korekcijas dėl išgarintų dujų temperatūros ir slėgio; reduktoriaus-garintuvo temperatūros jutiklis, naudojamas EVB, kad tinkamu metu automatiškai perjungti automobilio degalų rūšį; elektroninis valdymo blokas, kuris gauna signalus iš benzino purkštukų ir, pagal pirmą paminėtų jutiklių informaciją ir dujų purkštukų elektromechanines savybes, apskaičiuoja tinkamą dujų purkštukų atidarymo laiką, kad būtų išlaikyti kiek įmanoma tokie pat variklio darbo parametrai kaip naudojant benzino įpurškimą.

Dujų tiekimo EVB renką ir išsaugo benzino purkštukų atidarymo signalų duomenis visame variklio darbo diapazone ir sudaro lentelę, kurią vartotojas, jei yra poreikis, gali koreguoti, kad būtų pasiekti dujų purkštukų atidarymo laikai kuo artimesni benzino purkštukų atidarymo laikams ir išlaikomi automobilio gamintojo numatyti variklio darbo parametrai. Pagrindiniai ketvirtos kartos SND tiekimo sistemos privalumai:

- tikslus degalų dozavimas dėl atgalinio ryšio iš dujų slėgio ir temperatūros jutiklių;
- sistema sureguliuojama vieną kartą ir nereikalauja pakartotino reguliavimo eksploataciniu laikotarpiu;
- dujos tiekiamos atskirai į kiekvieną oro įsiurbimo kanalą kuo arčiau variklio įsiurbimo vožtuvų;

- automatinis degalų rūšies perjungimas įšilus varikliui, pasibaigus dujoms, įvykus gedimui sistemoje ir pan.;
- galimybė panaudoti automobilio deguonies jutiklio duomenis, kad reguliuoti degųjų mišinį;
- ekonomiškiausia ir turinti mažiausius variklio galios nuostolius iš dujinės fazės SND tiekimo sistemų;
- gali atitikti Euro 3 ir Euro 4 emisijų standartus;
- tinka daugumai automobilių elektronine ne tiesioginio įpurškimo benzino tiekimo sistema;

Trūkumai:

- didesnė įrangos kaina nei praeitų kartų;
- netinka automobiliams su mechanine benzino tiekimo sistema;
- teisingas veikimas yra priklausomas nuo benzino tiekimo sistemos tvarkingumo

Ši sistema pati neapskaičiuoja tiekiamų degalų kiekio, o tik korekcijas, kad benzino purkštukų valdymo signalą pritaikyti dujų purkštukų valdymui, todėl, norint sumontuoti automobilyje tokią sistemą, jame privalo būti pilnai elektroninė benzino tiekimo sistema.

3. Universalus kibirkštinio uždegimo variklio valdymo bloko analizė

Yra daugybė skirtingų universalių EVB, skirtų valdyti kibirkštinio uždegimo variklius. Jų pagrindinė užduotis yra apskaičiuoti reikalingą įpurkšti degalų kiekį bet kuriuo variklio darbo metu, valdyti visus elektroninius degalų tiekimo ir uždegimo sistemų komponentus, rinkti ir/arba gyvai pateikti duomenis iš visų EVB naudojamų jutiklių ir duomenis apie EVB valdomus komponentus ir atliktus skaičiavimus (degalų purkštukų atidarymo laikas, uždegimo paankstinimo kampas, įvairios korekcijos ir kt.). Taip pat pagal poreikį gali būti valdomi laisvos eigos oro tiekimo vožtuvas, aušinimo sistemos ventiliatoriai, turbokompresoriaus valdymo vožtuvas, vandens įpurškimo sistema, oro kondicionieriaus siurblys, generatorius ir kita įranga, kuri tiesiogiai nesusijusi su degalų tiekimu ir degiojo mišinio uždegimu.

Tokie EVB dažniausiai naudojami perdarant automobilio benzino tiekimo sistemą iš mechaninės į elektroninę; keičiant automobilio variklį tokiu, kuriam netinkama esama automobilyje degalų tiekimo valdymo sistema; siekiant pakelti variklio galią; norint sumontuoti ir stebėti papildomus jutiklius ar variklio valdymo komponentus, kurie nebuvo numatyti automobilio gamintojo; norint pakeisti tiekiamų degalų skaičiavimo algoritmą; norint praplėsti degalų tiekimo ir uždegimo sistemų komponentų valdymo galimybes ir kt. Toks valdymo blokas yra geras sprendimas norint perdaryti automobilio degalų tiekimo sistemą iš karbiuratorinės į elektroninio įpurškimo ir siekiant sumontuoti ketvirtos kartos SND tiekimo įrangą.

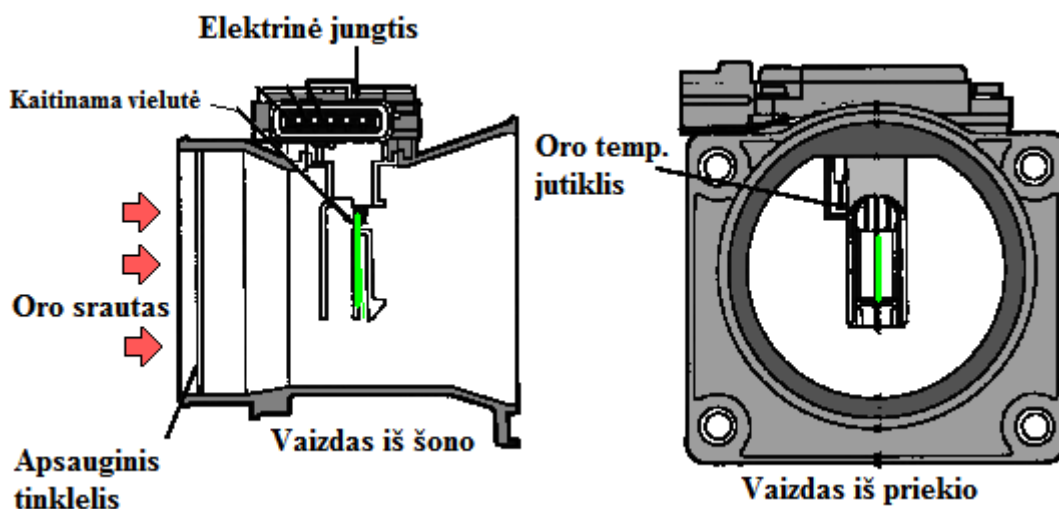
3.1. Tiekiamų degalų skaičiavimo algoritmai

Du svarbiausi parametrai, kuriuos EVB turi žinoti, kad apskaičiuoti įpurškiamų degalų kiekį yra variklio apsukos ir apkrova. Sužinoti apsukas galima lengvai ir tiksliai naudojant variklio alkūninio ar paskirstymo veleno padėties jutiklius, o norint sužinoti variklio apkrovą, reikia žinoti į variklį patenkančio oro masę. Pamatuoti oro masę galima naudojant oro srauto jutiklį; apskaičiuoti galima naudojant įsiurbimo kolektoriaus slėgio ir įsiurbiamo oro temperatūros jutiklius, idealiųjų dujų būsenos lygtį ir nurodant EVB variklio tūrinį efektyvumą; minimaliai įvertinti galima naudojant droselinės sklendės padėties ir įsiurbiamo oro temperatūros jutiklius. Kiekvienas iš šių būdų turi savų privalumų ir trūkumų ir yra naudojamas priklausomai nuo konkretaus variklio oro įsiurbimo sistemos konfigūracijos ir vartotojo poreikių.

3.1.1. Skaičiavimo metodas naudojant oro srauto jutiklį

Tai įpurškiamų degalų skaičiavimo algoritmas, kuris paremtas tuo, jog įsiurbiamo į variklį oro masė yra tiesiogiai pamatuojama naudojant oro srauto jutiklį (angl. hot wire mass airflow sensor arba MAF). Kadangi visą „darbą“ atlieka vienas jutiklis, visi degalų skaičiavimo algoritmo privalumai ir trūkumai yra nulemti šio jutiklio savybių. Oro srauto jutiklis yra montuojamas variklio įsiurbiamo oro trakto pradžioje ir pro jį prateka visas į variklį įsiurbiamas oras, jutiklio veikimas paremtas metalo elektrinės varžos priklausomybe nuo temperatūros. Jutiklyje nuolatine įtampa kaitinama labai plona viela iš metalo, kuris turi linijinę elektrinės varžos priklausomybę nuo temperatūros (dažnai tai - platina), o variklio įsiurbiamas oras ją aušina (žr.20 pav.). Kuo daugiau įsiurbiamas oro ir/arba kuo oras yra žemesnės temperatūros ir/arba tankesnis, tuo labiau vėsinama viela ir tuo didesnė elektros srovė gali ja tekėti, šią srovę matuoja elektronika jutiklyje, apskaičiuoja įsiurbiamo oro masę ir perduoda apdorotą signalą į variklio EVB. Nors toks jutiklis ir turi galimybę matuoti oro masę, šie jutikliai sukalibruojami veikti savo korpuse (kadangi pro jį privalo praeiti visas įsiurbiamas oras), todėl konkretus jutiklis renkamas pagal variklio oro srauto poreikius, kad jutiklio matavimo

rezoliucija nebūtų per maža esant minimaliai variklio apkrovai ir nebūtų viršyta maksimali matuojama oro masė esant maksimaliai variklio apkrovai. Tačiau gamyklinė jutiklio kalibracija numato jo naudojimą variklyje, kuriam jis sukurtas, tai yra konkrečiam variklio įsiurbimo sistemos dizainui, todėl naudojant jutiklį kitokioje įsiurbimo sistemoje net ir esant tokiems pat matuojamos oro masės reikalavimams, jo kalibracija vis vien nebus idealiai tinkama ir turės būti koreguojama EVB. Jutiklio kalibracija priklauso ir nuo oro pasipriešinimų prieš jį (vamzdynas, oro filtro dizainas, kt.), ir po jo (vamzdynas, įsiurbimo kolektoriaus dizainas, paskirstymo veleno/-ų savybės, kt.). Kiti trūkumai tai: jautrumas oro filtro ir jutiklio vielos užterštumui; neteisingi skaičiavimai esant oro nuotėkiui už jutiklio; įsiurbimo trakto dizaino apribojimai dėl jutiklio fizinių savybių. Dar vienas potencialus trūkumas yra tokio jutiklio sukuriamas oro pasipriešinimas įsiurbimo trakte, tai gali būti kritiška varikliams dirbantiems itin aukštais sūkiams arba naudojamiems atskiras droselines sklendes kiekvienam cilindriui.



20 pav. MAF jutiklis [26]

3.1.2. Skaičiavimo metodas naudojant oro slėgio ir temperatūros jutiklius

Speed-density arba lietuviškai – greičio-tankio algoritmui naudojami variklio sūkiu (greičio) bei oro slėgio įsiurbimo kolektoriuje ir įsiurbiamo oro temperatūros (tankio) jutikliai. Variklio įsiurbiamo oro masė yra apskaičiuojama remiantis paminėtų jutiklių duomenimis, idealiųjų dujų dėsnio, variklio tūriu ir vartotojo sudaryta variklio tūrinio efektyvumo lentele. Variklio tūrinis efektyvumas tai santykis tarp maksimalaus teorinio į vieną cilindrą įsiurbiamo oro kiekio (jis priklauso nuo jo darbinio tūrio) ir faktinio įsiurbiamo į tą cilindrą oro kiekio. Skirtinguose variklio darbo diapazonuose jo tūrinis efektyvumas skirtingas, jis priklauso nuo droseliavimo nuostolių, įsiurbimo trakto dizaino, paskirstymo veleno/-ų savybių, įsiurbiamo oro tankio ir daugybės kitų priežasčių ir tai įvertinama vartotojo sudaroma variklio tūrinio efektyvumo lentele, kuri išsaugoma EVB. Pagrindiniai šio metodo privalumai yra, jog skaičiavimuose naudojami jutikliai yra paprasti, patvarūs, greit reaguojantys, nesudaro pasipriešinimo įsiurbimo trakte, yra labai universalūs ir skaičiavimai nėra priklausomi nuo įsiurbimo trakto dizaino, todėl šį metodą galima pritaikyti daugybei variklių ir jis reikalauja minimalaus arba nereikalauja jokio įsiurbimo trakto perdarymo. Iš trūkumų reikia pabrėžti priklausomybę nuo teisingai sudarytos tūrinio efektyvumo lentelės ir įvairių temperatūros korekcijų, kurios lemia oro masės skaičiavimo tikslumą. Be to, variklio modifikavimai dažniausiai keičia jo tūrinį efektyvumą ir, pasikeitus tūriniam efektyvumui, atitinkamai turi būti pakeista ir tūrinio

efektyvumo lentelė EVB. Pavyzdžiui, MAF algoritmas gali įvertinti pasikeitusi tūrinį efektyvumą be vartotojo įsikišimo, jei dėl to nėra peržengiamos oro srauto jutiklio matavimo galimybės.

3.1.3. Skaičiavimo metodas naudojant droselinės sklendės padėties jutiklį

Paprasčiausias iš visų minėtų skaičiavimo algoritmų, dar vadinamas Alpha-N, kuriame įsiurbiamo oro masė (variklio apkrova) vertinama pagal droselinės sklendės atidarymo kampą (α) ir variklio sūkius (N) ir nėra matuojama ar apskaičiuojama. Vartotojui, panašiai kaip naudojant speed-density algoritmą, privaloma sudaryti EVB lentelę, tačiau šiuo atveju ji naudojama kaip pagrindinis kintamasis apskaičiuoti įpurškiamus degalus. Sudaroma variklio sūkių ir droselinės sklendės priklausomybių lentelę nurodo, kiek degalų turi būti įpurškiama bet kuriame variklio darbo režime. Lentelės sudarymą apsunkina tai, jog droselinės sklendės atidarymo kampas (skirtingai nei oro slėgis įsiurbimo kolektoriuje) neatspindi variklio apkrovos. Esant mažiems variklio sūkiams, varikliui gali užtekti, tarkim, 15% atidarytos droselinės sklendės, kad būtų įsiurbiamas pakankamai oro pilnai apkrauti variklį. Vartotojas turi nuspėti arba bandymų būdu sužinoti, kur lentelėje yra pilna variklio apkrova. Be šios lentelės, algoritme skaičiavimui naudojamos tik pastovios variklio duomenų vertės ir droselinės sklendės atidarymo kampas. Algoritmas netinkamas varikliams su priverstiniu oro pripūtimu, nes oro tankis praktiškai nėra priklausomas nuo droselinės sklendės padėties; ir varikliams su smarkiai svyruojančia apkrova. Dažniausi šio algoritmo panaudojimai yra atmosferiniai varikliai su atskira droseline sklende kiekvienam cilindriui ir/arba varikliai, naudojantys paskirstymo veleną/-us su dideliu vožtuvų perdengimo – tai atvejai, kai nei MAF, nei speed-density algoritmai nėra tinkami naudoti, kadangi montuoti oro srauto jutiklį yra neprasminga ir nėra sudaromas tinkamas oro slėgio signalas apkrovai įvertinti atitinkamai.

3.1.4. Speed-density algoritmo skaičiavimai

Keičiant automobilio degalų tiekimo sistemą iš karbiuratorinės į elektroninę, šis degalų tiekimo skaičiavimo algoritmas yra patraukliausias dėl to, kad reikalauja minimalių automobilio įsiurbimo sistemos perdarymų ir naudoja universalius jutiklius, tai žymiai supaprastina jo pritaikymą. Kaip jau minėta praeitame skyriuje, skaičiavimams naudojami tik trijų jutiklių duomenys, variklio pastovūs duomenys ir variklio tūrinio efektyvumo lentelė, kurią sudaro vartotojas ir išsaugo EVB.

Norint sužinoti, kiek reikia duotajam varikliui įpurkšti degalų bet kuriuo momentu, iš pradžių reikia sužinoti, kiek reikia įpurkšti degalų, kad pasiekti stochiometrinį mišinį. Stechiometrinis mišinys tai idealus oro ir degalų mišinys, kai mišinyje yra tiek deguonies, kiek būtina pilnam mišinio sudegimui. Idealiųjų dujų būsenos lygtis (1) nusako idealiųjų dujų kiekio priklausomybę nuo jų tūrio, temperatūros ir slėgio. Tai yra fundamentali EVB įpurškiamų degalų skaičiavimo dalis.

$$PV = nRT \quad (1)$$

Kur:

P – dujų slėgis;

V – dujų tūris;

n – dujų kiekis moliais;

R – universalioji dujų konstanta;

T – absoliutinė temperatūra

1 molyje dujų yra $6.023 \cdot 10^{23}$ dujų molekulių, o dujų masė yra tiesiogiai susijus su jų kiekiu ir moline mase. Dujų masę galima išreikšti:

$$M = n * MM \quad (2)$$

Kur:

M – dujų masė;

n – dujų kiekis moliais;

MM – dujų molinė masė

Panaudojus (1) ir (2) lygtis, variklio įsiurbiamo oro masę galima išreikšti:

$$M_{oro} = \frac{PV}{RT} * MM_{oro}; \quad (3)$$

Šią lygtį galima toliau pertvarkyti įvertinant variklio tūrinį efektyvumą:

$$M_{oro} = \frac{VE * MAP * V}{R * IAT + 273.15}; \quad (4)$$

Kur:

VE – variklio tūrinis efektyvumas, %;

MAP – oro slėgis įsiurbimo kolektoriuje, kPa;

V – vieno cilindro darbinis tūris, l;

R - 8.314472, J/(mol*K);

IAT – oro temperatūra įsiurbimo kolektoriuje, °C ($K = °C + 273.15$);

Kadangi idealiųjų dujų konstanta ir oro molekulinė masė yra pastovūs dydžiai, jie įrašomi EVB gamintojo programiniame kode ir skaičiavimuose toliau yra neminimi.

Toliau reikia apskaičiuoti purkštukų atidarymo laiką, kuris reikalingas, kad įpurkšti tokį degalų kiekį, kuris sudarytų stochiometrinį mišinį esant 100% duotojo variklio tūriniam efektyvumui (VE) ir fiksuotoms aplinkos sąlygom. Tam naudojama ši lygtis:

$$REQ.FUEL = \frac{60000 * V_{varikl.} * \rho_{oro}(100 \text{ kPa}, 21.11 \text{ } ^\circ\text{C})}{(n_{cil} * AFR * purkšt.sraut.) * \left(\frac{1}{ipuršk.cikl.}\right)} \quad (5)$$

Kur:

60000 – milisekundžių skaičius minutėje, kad pakeisti purkštukų srautą;

$V_{varikl.}$ – variklio tūris, m^3 ;

ρ_{oro} - oro tankio korekcijos funkcija esant 100 kPa absoliutiniam slėgiui ir 21.11°C oro temperatūrai įsiurbimo kolektoriuje ir 101.592 kPa atmosferos slėgiui, kg/m^3 ;

n_{cil} – variklio cilindrų skaičius;

AFR – stochiometrinis oro/degalų masės mišinys;

$purkšt.sraut.$ – pilnai atidarytų degalų purkštukų srautas esant duotam degalų slėgiui, kg/min;

$įpuršk.cikl.$ – vieno purkštuko įpurškimų skaičius per vieną pilną variklio ciklą

Oro tankio korekcijos funkcija nusakoma:

$$\rho_{oro} = 1.2928 * \frac{273.15}{IAT+273.15} * \frac{MAP}{101.325} \quad (6)$$

Kur:

1.2928 – aplinkos oro tankis esant 101.325 kPa slėgiui ir 0 °C temperatūrai;

EVB apskaičiuotas laikas iš (5) lygties toliau yra apdorojamas pridedant ir dauginant iš kitų dydžių, kad būtų gauta galutinė įpurškimo trukmė (angl. pulse width. Toliau - PW), kadangi stochiometrinis degalų mišinys nebūtinai yra ekonomiškiausias, leidžiantis išvystyti didžiausią variklio galią ir/ar atitinkantis labai greitai besikeičiančius variklio darbo parametrus (žr.7 lygt.).

$$PW = REQ.FUEL * VE(RPM, MAP) * MAP * E + pagr. + purkšt. atidar. laik. \quad (7)$$

Kur:

$REQ.FUEL$ – (žr.6 lygt);

$VE(RPM, MAP)$ – vartotojo sudaroma variklio tūrinio efektyvumo lentelė (priklausomybė nuo apsučių (RPM) ir slėgi įsiurbimo kolektoriuje (MAP)) (žr.21 pav.), %/100;

MAP – slėgis įsiurbimo kolektoriuje, kPa/100;

$purkšt.atidar.laik.$ – vartotojo nurodytas degalų purkštukų atidarymo laikas, ms;

$pagr.$ – įpurškimo laiko padidinimas EVB aptikus pagreičio sąlygą, ms;

E – papildomų mišinio pariebinimų/paliesinimų įvertinimas, %;

Visų kitų korekcijų sandauga E (angl. enrichment) yra daugiklis taikomas $REQ.FUEL$ skaičiavimui kartu su MAP ir VE daugikliais, kad įvertinti visas korekcijas ir pakeisti $REQ.FUEL$ skaičiavimą pagal esamas variklio darbo sąlygas. Visos šios korekcijos vertinamos procentais, kur 100% reiškia, kad neatliekama jokių pakeitimų nuo pradinės $REQ.FUEL$ reikšmės, kadangi visi daugikliai normalizuojami dalinant iš 100, kad gauti trupmeninį daugiklį (žr.8 lygt.).

$$E = \left(\frac{Darb.temp.}{100} \right) * \left(\frac{O_2 užd.ar.rat.}{100} \right) * \left(\frac{Oro.kor.}{100} \right) * \left(\frac{Baro.kor.}{100} \right) \quad (8)$$

Kur:

$Darb.temp.$ – mišinio korekcija po variklio užvedimo ir iki jo sušilimo iki darbinės temperatūros. Šios korekcijos parametrai nustatomi vartotojo;

O_2 uždar.rat. – mišinio korekcija pagal duomenis iš deguonies jutiklio išmetamosiose dujose. Šios korekcijos parametrai nustatomi vartotojo;

O_{rokor} . – oro tankio korekcija, kuri apskaičiuojama pagal įsiurbiamo oro temperatūrą;

$Baro_{kor}$. – barometrinė korekcija pagal aplinkos slėgį;

Barometrinę korekciją EVB apskaičiuoja iš naujo kiekvienu EVB įjungimo metu, kol variklis dar nedirba. Arba korekcija gali būti atnaujinama reguliariai, jei sumontuojamas papildomas slėgio jutiklis. Tai naudinga, kai automobilis eksploatuojamas esant dideliems altitudės pokyčiams.

Galutinio purkštukų atidarymo laiko lygtyje (7) pridedamas purkštukų atidarymo laikas, kadangi degalų purkštukas yra elektromechaninis prietaisas ir jam reikia sąlyginai nemažo laiko, kol jis pilnai atsidaro ir įpurškiamų degalų kiekis įgauna linijinę priklausomybę nuo purkštuko atidarymo laiko. Šį laiką būtina pridėti, kad galutinė atidarymo laiko reikšmė nebūtų per maža.

Įsiurbimo kolektoriaus slėgis, kPa	160	72	74	74	78	82	85	86	88	91	93	96	100
	143	72	74	76	80	81	83	85	87	89	91	94	98
	129	72	76	78	79	80	82	84	86	88	89	91	96
	115	72	74	76	78	79	81	84	85	87	88	89	94
	101	72	74	74	74	78	80	83	84	85	86	88	92
	87	70	72	72	72	75	77	81	83	85	84	85	92
	80	66	71	67	66	68	71	75	78	80	83	86	89
	73	60	57	56	60	62	65	69	74	75	76	78	82
	66	54	53	55	59	61	64	66	72	71	74	77	80
	60	50	50	54	58	60	62	63	64	63	62	67	68
	50	44	46	50	55	57	59	60	63	51	51	53	57
	35	40	42	49	53	56	59	52	47	47	47	49	50
	↳	700	1000	1300	1600	2200	2700	3200	3700	4200	4700	5200	5800
		Variklio apsukos, aps/min											

21 pav. Vartotojo sudaroma variklio tūrinio efektyvumo lentelė

3.2. Papildomi EVB naudojami jutikliai

Kaip jau minėta anksčiau, EVB savo skaičiavimuose naudoja keletą jutikliais pamatuotų reikšmių. Tačiau be šių, privalomų, jutiklių dažniausiai naudojami ir kiti, kurių duomenys naudojami atlikti svarbioms funkcijoms:

- Aušinimo skysčio temperatūros jutiklis naudojamas nustatyti variklio užvedimo metu reikalingą purkštukų atidarymo laiką, nes esant labai mažoms ir gan netolygioms variklio apsukoms užvedimo metu yra nepakankamas oro srautas ir svyruojantis slėgis įsiurbimo kolektoriuje, todėl įpurškimo trukmė negali būti skaičiuojama pagal įprastus algoritmus; degiojo mišinio pariebinimui, kol variklis išyla, nes esant šaltam varikliui degalai prasčiau išgarinami ir jų reikia įpurkšti daugiau, kad palaikyti stabilų variklio darbą; laisvos eigos vožtuvo valdymui, kad į variklį būtų tiekiamas papildomas oras, kol jis sušyla. Taip pat gali būti naudojamos apsauginės funkcijos matant perkaistančio variklio būseną – uždegimo kampo koregavimas; turbokompresoriaus pripūtimo slėgio sumažinimas ir kt.

- Droselinės sklendės padėties jutiklis naudojamas aptikti išibėgėjimo/lėtėjimo būsenas, kad būtų įpurškiama daugiau degalų esant pereinamajai būsenai arba sumažinamas įpurškiamų degalų kiekis, kai automobilis lėtėja esant įjungtai pavarai; užvedimo metu, aptikus daugiau nei nustatyta riba atidarytą droselinę sklendę, drastiškai sumažinamas įpurškimo laikas, kad galima būtų išvalyti susikaupusius cilindre degalus sunkaus užvedimo metu; išjungti uždaro rato kontrolę pagal deguonies jutiklį išmetamosiose dujose, kai aptinkama daugiau nei nustatyta riba atidaryta droselinė sklendė, jei naudojamas siaurajuostis deguonies jutiklis (jis tiekia patikimus duomenis tik labai arti stochiometrinio mišinio).
- Deguonies jutiklis tiekia EVB informacija, ar yra įpurškiamas teisingas degalų kiekis. Siaurajuostis jutiklis yra tikslus tik esant labai arti stochiometrinio mišinio, todėl yra tinkamas naudoti uždaro rato kontrolei tik esant mažoms variklio apkrovoms. Plačiajuostis jutiklis patikimai nustato oro-degalų masės santykius (angl. air fuel ratio. Toliau - AFR) maždaug nuo 10 iki 20. Naudojant plačiajuostį jutiklį galima nuolatine uždaro rato kontrole visame variklio darbo diapazone ir automatinis VE lentelės koregavimas pagal vartotojo sudaryta AFR lentelę (žr.22 pav.).

Įsiurbimo kolektoriaus slėgis, kPa	160	14.7	13.0	13.0	13.0	13.0	12.8	12.8	12.8
	135	14.7	13.5	13.5	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2
	113	14.7	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
	91	14.7	14.2	14.2	14.2	13.7	13.7	13.7	13.7
	70	14.7	15.5	17.0	17.0	16.0	14.0	14.0	14.0
	55	14.7	15.5	17.0	17.0	16.0	14.0	14.0	14.0
	40	14.7	15.5	17.0	17.0	16.0	14.0	14.0	14.0
	20	14.7	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5
	↳	700	1300	1700	2200	2800	3500	4700	5800
Variklio apsukos, aps/min									

22 pav. Vartotojo sudaroma oro-degalų santykių lentelė uždaro rato degiojo mišinio korekcijai pagal lambda jutiklį

Be šių jutiklių, priklausomai nuo konkretaus EVB funkcionalumo, dar galima prijungti ir stebėti ar net įtraukti į skaičiavimus kitus jutiklius, jei vartotojui yra toks poreikis.

3.3. Oro-degalų mišinys

Įpurškiami į variklį degalai susimaišo su įsiurbiamu oru ir sudaro degujį mišinį. Labai svarbus parametras, kuris apibūdina degujį mišinį ir yra lengvai pamatuojamas standartiniais automobiliuose naudojamais jutikliais - oro-degalų masės santykis. Tiesiogiai oro-degalų masės santykis praktikoje nėra matuojamas, tačiau yra matuojamas likutinis deguonies santykis išmetamosiose dujose, tam naudojamas deguonies jutiklis automobilio išmetimo sistemoje (dar vadinamas lambda zondų). Jutiklis veikia lygindamas likutinį deguonies kiekį išmetamosiose dujose su deguonies kiekiu atmosferoje. Jei išmetamosiose dujose deguonies daug – degusis mišinys turėjo degalų trūkumą; jei deguonies išmetamosiose dujose mažai – degusis mišinys turėjo degalų perteklių. Praktikoje mišinys su degalų pertekliumi vadinamas riebiu, su trūkumu - liesas. Deguonies jutiklio duomenys kartu su

vartotojo sudaroma oro-degalų santykių lentelė leidžia EVB vykdyti uždaro rato degiojo mišinio kontrolę.

Uždaro rato kontrolė yra būtina norint palaikyti stabilų, nuspėjamą ir atkartojamą variklio darbą įvairiais režimais. Skirtingi oro-degalų mišiniai turi skirtingus privalumus ir trūkumus. Degalai geriausiai sudega ir paprastai mažiausios emisijos yra esant stochiometriniam mišiniui, tačiau tada pasiekiamos didžiausios degimo ir išmetamųjų dujų temperatūros, todėl tokio mišinio panaudojimas ribojamas lengviems ir vidutiniams variklio krūviams. Liesas mišinys gali būti naudojamas pagerinti degalų sąnaudas ir padidinti variklio tūrinį efektyvumą sumažinant droseliavimo nuostolius, tačiau nukenčia variklio momentinę reakciją į galios pokyčio poreikius ir galia. Liesas mišinys paprastai negali būti naudojamas, kai yra didesnė variklio apkrova dėl kylančios detonacijos. Riebus mišinys dega žemesne temperatūra ir juo pasiekama didesnė variklio galia, tačiau padidėja emisijos ir sumažėja variklio efektyvumas. Riebiu mišiniu gali būti aušinamas variklio įsiurbiamas oras, jei naudojami skystieji degalai, kurie įpurškiami išgaruoja. Taigi variklio darbo metu reikalinga nuolatos stebėti ir keisti oro-degalų santykį pagal automobilio važiavimo poreikius ir balansuoti tarp mažiausių emisijų, geriausių degalų sąnaudų ir didžiausios variklio galios.

Skirtingos degalų rūšys turi skirtingą stochiometrinį oro-degalų masės santykio mišinį: benzinas – 14,7:1; SND - ~15,5:1. Norint palyginti skirtingų degalų rūšių degiuosius mišinius, naudojamas oro-degalų mišinio ekvivalentiškumo santykis. Tai santykis tarp pamatuoto oro-degalų santykio ir stochiometrinio pasirinktos degalų rūšies santykio ($\lambda = \frac{\text{Pamatuotas oro-degalų santykis}}{\text{Stochiometrinis oro-degalų santykis}}$), tai bematis dydis žymimas λ raide. Jį naudojant, bet kokiai degalų rūšiai stochiometrinis mišinys – $\lambda=1,0$.

3.4. Naudojimas kartu su SND tiekimo sistema

Nors SND turi didesnę oktanių skaičių nei benzinas, degalinėse perkamų degalų tiksli sudėtis nėra žinoma ir keičiasi tarp skirtingų degalinių, nuo metų laiko ir kitų faktorių. Yra pakankamai nemaža variacija tarp SND oktanių skaičiaus (94-112 RON), todėl norint išgauti didesnę variklio galią ir sumažinti išmetamųjų dujų temperatūrą, tikslinga ankstinti mišinio uždegimo laiką, kai variklis dirba dideliais sukiais ir didele apkrova. Ankstinti uždegimo laiką didėjant variklio apsukoms yra būtina, nes, nekeičiant uždegimo laiko, mažėja laikas, per kurį mišinys gali degti. Gamyklinės, ketvirtos kartos, SND tiekimo sistemos nekoreguoja mišinio uždegimo paankstinimo kampo. Naudojant universalų benzino tiekimo sistemos valdymo EVB, galima sudaryti atskiras uždegimo paankstinimo kampų lenteles automobiliui naudojant benzino įpurškimą ir SND, kurios automatiškai persijungs perjungiant degalų rūšį.

4. Degalų tiekimo sistemų tyrimas

Tyrimui gamyklinė automobilio karbiuratorinė benzino tiekimo sistema buvo perdaryta į elektroninę naudojant „Megasquirt 1“ elektroninį valdymo bloką. Tai buvo būtina norint į automobilį sumontuoti ketvirtos kartos SND tiekimo sistemą. Tyrimo metu buvo naudojama: pirmos kartos SND tiekimo sistema; ketvirtos kartos SND tiekimo sistema; ketvirtos kartos SND tiekimo sistema papildomai keičiant benzino tiekimo EVB parametrus. Lyginamos degalų sąnaudos, variklio galia (netiesiogiai) ir žalingos išmetamųjų dujų emisijos automobilio varikliui veikiant su skirtingomis degalų tiekimo sistemomis.

Matuojant degalų sąnaudas buvo tiriamas oro-degalų ekvivalentiškumo santykis ir įsiurbimo kolektoriaus slėgis; matuojant automobilio įsibėgėjimą buvo tiriamas oro-degalų ekvivalentiškumo santykis pradiniu įsibėgėjimo momentu ir viso įsibėgėjimo eigoje; matuojant žalingas išmetamųjų dujų emisijas buvo lyginamas jų kiekis; tiriamas oro-degalų ekvivalentiškumo santykis ir įsiurbimo kolektoriaus slėgis.

4.1. Degalų sąnaudų tyrimas

4.1.1. Matavimo metodika

Benzinas:

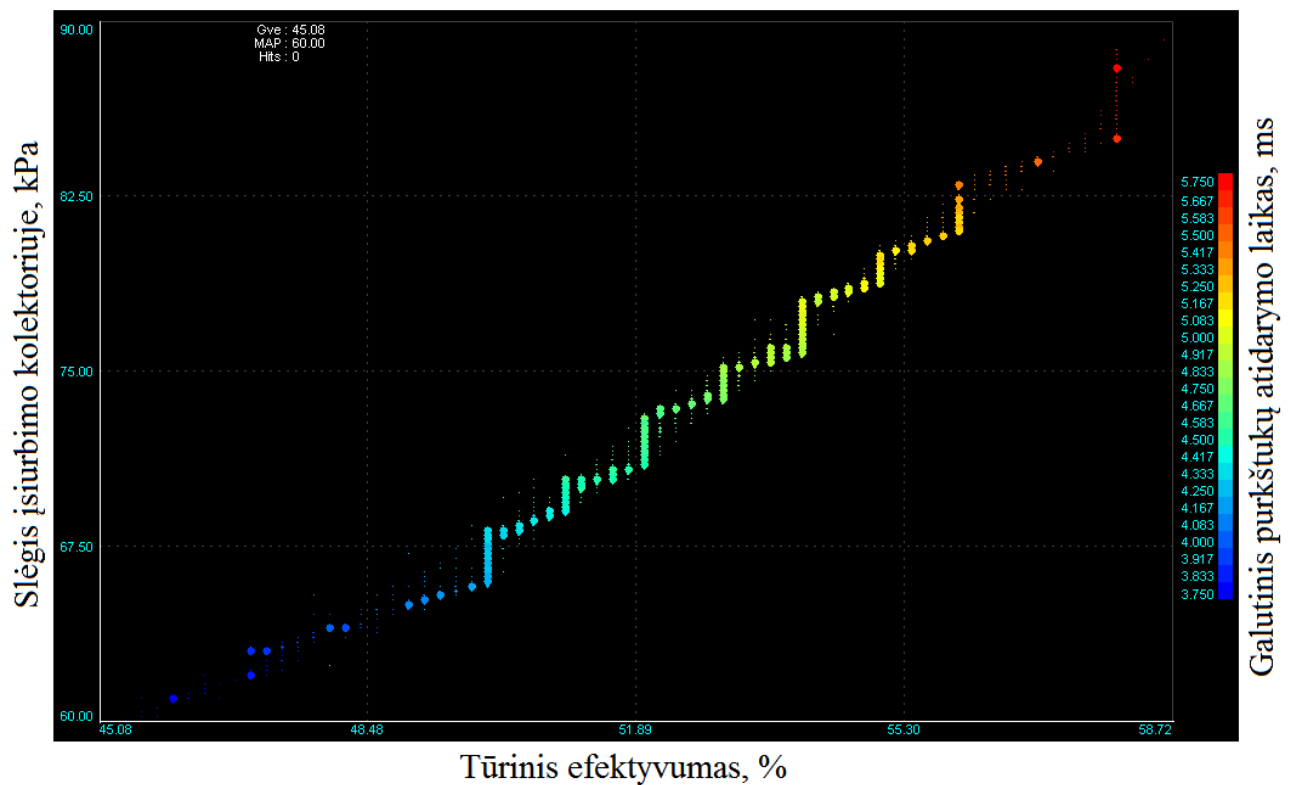
1. Naudojant SND, važiuojama iki pastovių degalų sąnaudų matavimo maršruto pradžios.
2. Pasiekiamas matavimo greitis (100km/h) ir variklis perjungiamas į darbą benzinu.
3. Pravažius maršrutą, variklis perjungiamas į darbą SND ir grįžtama į pradinę vietą.
4. Iš EVB fiksuojamų duomenų ir žinomų automobilio parametrų apskaičiuojamos degalų sąnaudos.

Dujos (trys matavimai – 1-os kartos SND įranga; 4-tos kartos SND įranga; 4-tos kartos įranga su benzino tiekimo EVB parametrų pakeitimu):

1. Automobilis užpildomas degalais.
2. Dujų bakas išimamas iš automobilio, pasveriamas ir sumontuojamas atgal.
3. Naudojant benzina, važiuojama iki pastovių degalų sąnaudų matavimo maršruto pradžios.
4. Pasiekiamas matavimo greitis (100km/h) ir variklis perjungiamas į darbą SND.
5. Pravažius maršrutą, variklis perjungiamas į darbą benzinu ir grįžtama.
6. Dujų bakas vėl išimamas ir pasveriamas, gaunama sunaudotų dujų masė.
7. Apskaičiuojamos sunaudos.

4.1.2. Benzino sąnaudų tyrimas

Prieš žvelgiant į galutinį degalų sąnaudų rezultatą, tikslinga aptarti parametrus, kurie daro joms didžiausią įtaką važiuojant pastoviu greičiu. Iš anksčiau minėtų lygčių (7-8) matome, kad įpurškiamą degalų kiekį lemia vartotojo sudaryta VE lentelė, MAP jutiklio duomenys ir toliau taikomos mišinio korekcijos. *REQ.FUEL* ir *purkšt.atidar.laik.* šiuo atveju yra nekintantys dydžiai ir gali būti nepaisomi, kaip ir *Darb.temp.* bei *Baro_{kor.}* korekcijos, nes jos veikia tik prieš variklio užvedimą ir iki darbinės temperatūros pasiekimo. Purkštukų atidarymo laiko priklausomybė nuo VE dydžio ir MAP jutiklio duomenų galima pamatyti išanalizavus iš EVB surinktus bandymo metu duomenis (žr.23 pav.). Duomenų apdorojimui naudojama programa „MegaLogViewer HD“.



23 pav. Galutinio purkštukų atidarymo laiko priklausomybė nuo MAP ir VE

23 pav. matomiems duomenims pritaikytas filtras, kad išskirti duomenis, kurie atitinka važiavimo greitį nuo 95 iki 105 km/h, droselinės sklendės atidarymą 22-29% ir variklio apsukas 2400-2600 aps/min. Šios reikšmės pasirinktos atsižvelgus į duomenų kitimo ribas, kad apimti visą bandymo metu kylančią duomenų variaciją dėl rankiniu būdu palaikomo greičio. Varikliui dirbant nedidelėmis apkrovomis, įsiurbimo kolektoriaus slėgis ženkliai keičiasi nuo nedidelio droselinės sklendės padėties pokyčio, tai atsispindi kaip vertikalios slėgio pokyčio linijos 23 pav. Tūrinio efektyvumo reikšmė tuo atveju nekinta, nes nespėja ženkliai pasikeisti variklio apsukos, kad pereiti į kitą VE lentelės eilę. Tarpinės reikšmės tarp diskretiškų žingsnių VE lentelėje gaunamos EVB interpoliuojant reikšmes iš artimiausių celių. Įsiurbimo kolektoriaus slėgio reikšmių priklausomybė nuo droselinės sklendės atidarymo geriau pastebima žvelgiant į reikšmių grafiką per laiką (žr.24 pav.). Automobilio greitis nėra EVB fiksuojamas dydis ir yra apskaičiuojamas (9).

$$V_{5pav.} = \frac{3,6 * RPM * \pi * r_r}{30 * i_{5pav.} * i_{pagr.pav.}} \quad (9)$$

Kur:

3,6 – daugiklis pakeisti greitį iš m/s į km/h;

RPM – variklio apsukos, aps/min;

r_r – automobilio rato spindulys, m;

30 – daugiklis pakeisti ratų sukimosi greitį iš rad/s į aps/min;

$i_{5pav.}$ – 5 pavaros perdavimo skaičius. Šis dydis yra žinomas - 0,54;

$i_{pagr.pav.}$ – pagrindinės pavaros perdavimo skaičius. Šis dydis yra žinomas - 4,9;

Rato spindulys r_r apskaičiuojamas pagal padangos matmenis (10). Tiriamojo automobilio padangos - 175/65 R14. Padangos susispaudimas nevertinamas.

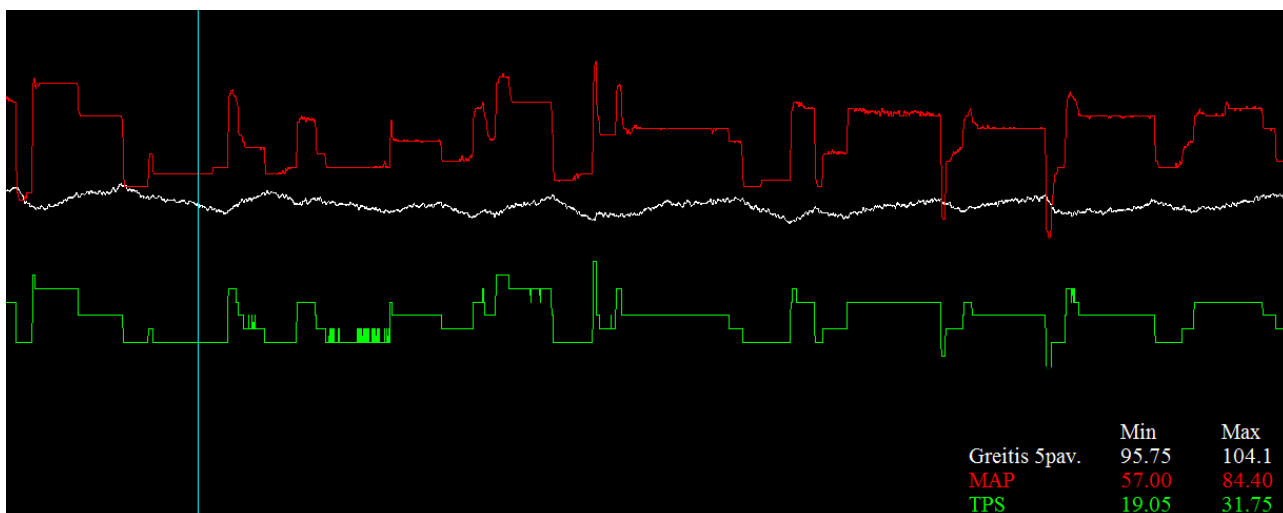
$$r_r = \frac{D*25,4+2H}{2*1000} \quad (10)$$

Kur:

D – rato skersmuo coliais – 14;

25,4 – daugiklis pakeisti colius į milimetrus;

H – padangos aukštis (175*0,65), mm.



24 pav. MAP (—), TPS (—) ir automobilio greičio (balta kreivė) reikšmių kitimas benzino sąnaudų matavimo metu

24 pav. matosi, kad MAP beveik tiksliai seka TPS pokyčius, kurie daromi stengiantis palaikyti greitį artimą 100km/h. Kiti veiksniai keičiantys MAP reikšmes nuo vairuotojo nepriklauso, tai gali būti kelio dangos pokytis, įkalnė/nuokalnė, vėjo kryptis ir kt.

Įpurškimo laiko korekcija aptikus pagreičio sąlygą - $pagr.$ (7) - sudaroma vartotojo ir skirta momentaliai padidinti PW , kai aptinkamas staigus TPS arba MAP signalo pokytis pasirinktinai. Tai nurodo staigų droselinės sklendės padėties pasikeitimą ir tuo staigiai padidėjusį oro srautą į variklį. Šios korekcijos veikimo laikas trumpas, paprastai iki ~1000ms, nes skirtas kompensuoti į variklį patenkančią oro masę iš įsiurbimo kolektoriaus. Po to oro srautas stabilizuojasi ir korekcija nebereikalinga. Bandymo metu (10 min.) $pagr.$ korekcijos bendras veikimo laikas sudarė 5,3 sekundės, todėl jos irgi galima nepaisyti nagrinėjant degalų sąnaudas.

Per vieną variklio darbo ciklą įpurškiamų degalų tūrį galima apskaičiuoti žinant purkštukų pralaidumą, degalų slėgį sistemoje ir panaudojus EVB fiksuojamus duomenis (11). Degalų slėgį reikia žinoti, kad perskaičiuoti purkštukų pralaidumą, jei degalų slėgis skiriasi nuo pateikto purkštukų gamintojo specifikacijoje.

$$V_{deg.} = n_{purkšt.} * (PW - purkšt. atidar. laik.) * Q_{purkšt.} \quad (11)$$

Kur:

$n_{purkšt.}$ – degalų purkštukų skaičius;

PW – (žr.7 lygt.)

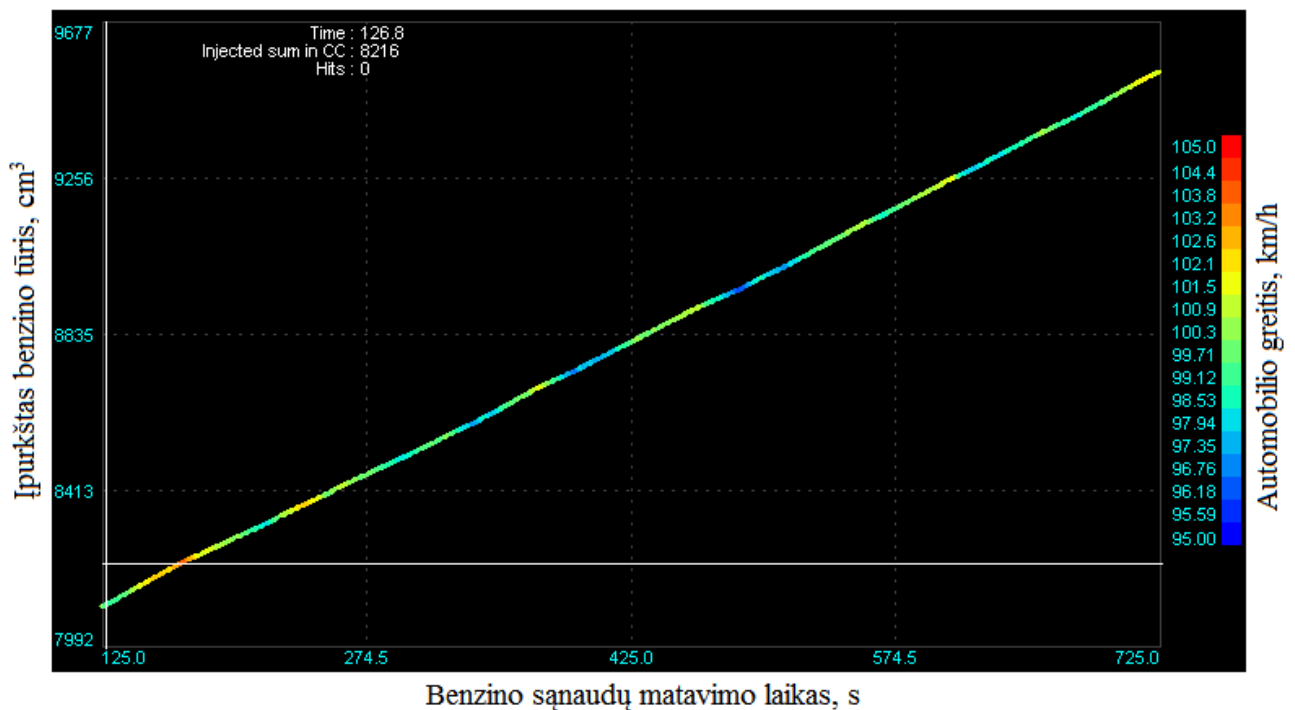
$purkšt.atidar.laik.$ – (žr.7 lygt.)

$Q_{purkšt.}$ – degalų purkštukų pralaidumas, cm^3/ms ;

PW veikiant varikliui nuolat kinta, todėl bendras įpurkštų degalų tūris apskaičiuojamas sudedant kas ciklą įpurškiamų degalų tūrį. Variklio darbo ciklų skaičius per sekundę apskaičiuojamas žinant variklio apsukas (12). Lygtyje dalinama iš 2, kad iš apsukų gauti darbo ciklus, kadangi keturtakčiame variklyje vieno cilindro darbo ciklas įvyksta kartą per 2 alkūninio veleno apsisukimus.

$$n_{cikt.} = \frac{RPM}{2*60} * \Delta t \quad (12)$$

Panaudojus (11) ir (12) lygtis, programoje „MegaLogViewer HD“ įvedamas kintamasis $I_{purkštų\ degalų\ tūris}$ ir pasirenkamas 10 minučių bandymo laikotarpį, kai išlaikomas pakankamai stabilus važiavimo greitis, ir sužinomas per tą laiką sunaudotas degalų tūris (žr.25 pav.).



25 pav. Įpurškto benzino tūris ir greičio svyravimas benzino sąnaudų matavimo metu

Per bandymo laiką sunaudotas degalų tūris sužinomas kaip skirtumas tarp $I_{purkštų\ degalų\ tūrio}$ reikšmių bandymo laikotarpio galuose ir yra lygus $\sum V_{deg.} = 1444\ cm^3$. Degalų sąnaudos išreiškiamos patogesne forma perskaičiuojant jas šimtui kilometrų (13).

$$Deg.\ sąn. = \frac{\sum V_{deg.}}{s_{band.} * 10} = \frac{1444}{16,59 * 10} \approx 8,7\ l/100km \quad (13)$$

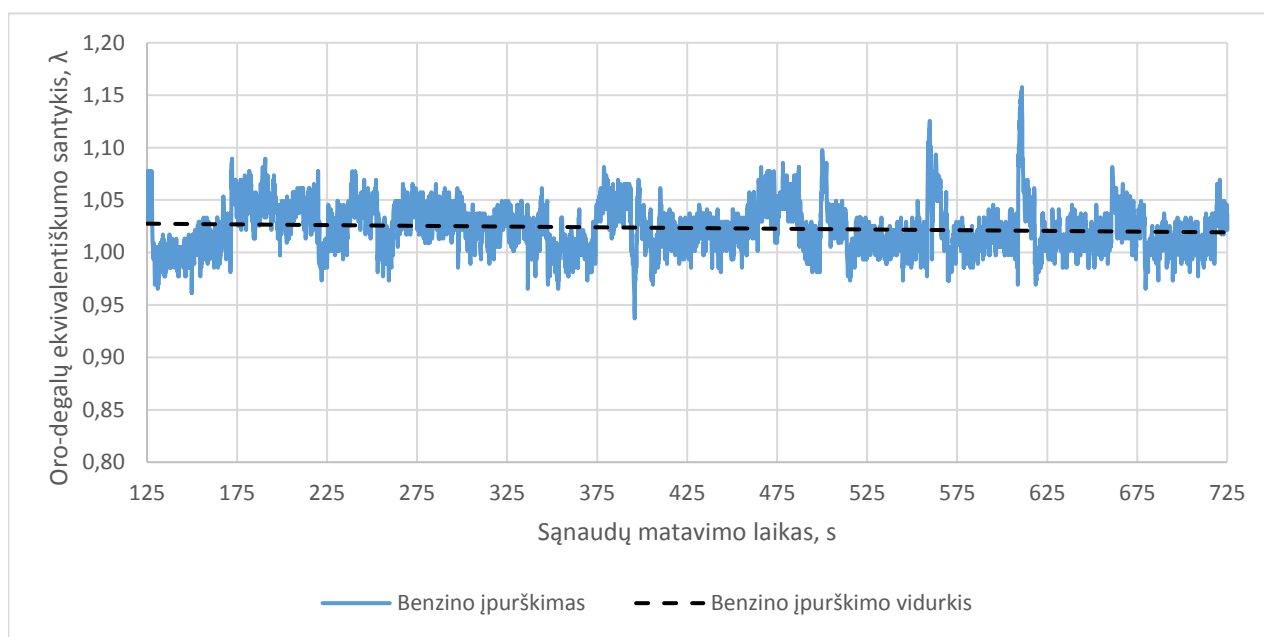
Kur:

$\sum V_{deg.}$ – bandymo metu įpurkštų degalų tūris, cm^3 ;

l_0 – daugiklis, kad gauti galutinį rezultatą $l/100\text{km}$;

$s_{band.}$ – bandymo metu nuvažiuotas kelias, km. Apskaičiuojamas programoje pagal (9) lygtį ir bandymo laiką

Tiriant degalų sąnaudas būtina atsižvelgti į tai, koks buvo naudojamas degusis mišinys (žr.26 pav.). Variklis gali veikti su ganėtinai plačiose ribose svyruojančiu degioju mišiniu, kai yra nedidelė apkrova.



26 pav. Oro-degalų ekvivalentiškumo santykis benzino sąnaudų tyrimo metu

Vidutinis oro-degalų ekvivalentiškumo santykis – $\lambda = 1,02$.

4.1.3. Dujų sąnaudų tyrimas

Kaip jau minėtą anksčiau, SND yra išgarinamos ir tiekiamos į variklį dujinės būsenos, o išgarintų dujų slėgis priklauso nuo SND cheminės sudėties ir išgarinimo temperatūros. SND sistemos EVB leidžia matyti tik momentines dujų slėgio, temperatūros ir įpurškimo laiko reikšmes ir neturi galimybės rinkti šių duomenų. Dėl šių priežasčių SND sąnaudas pasirinkta ne apskaičiuoti pagal EVB duomenis, o pamatuoti.

SND bako masė matuota svarstyklėmis „Steinberg SBS-PT-50/2“, kurių techniniai duomenys pateikti 4 lent.

4 lentelė. Svarstyklių techniniai duomenys [19]

Mažiausia fiksuojama masė	12g
Didžiausia fiksuojama masė	50kg
Tikslumas	2g

Atlikti trys bandymai:

1. Naudojant pirmos kartos SND įrangą;
2. naudojant ketvirtos kartos SND įrangą;
3. naudojant ketvirtos kartos įrangą ir papildomai keičiant benzino tiekimo EVB parametrus

Bandymų metu greitis ir nuvažiuotas atstumas apskaičiuojamas iš benzino tiekimo sistemos EVB surinktų duomenų taip pat kaip skaičiuojant benzino sąnaudas praeitame skyrelyje. Bandymų sąlygos:

- Bandymai atlikti trijų dienų eigoje važiavimui pasirenkant dienos metą su tokia pat oro temperatūra (~5°C);
- SND pildyta toje pačioje degalinėje, kol išgirstamas apsauginio vožtuvo suveikimas;
- Prieš bandymus įsitikinama, kad variklis yra pasiekęs stabilią darbinę temperatūrą ir, antram ir trečiam bandymams, EVB nėra aktyvios susijusios degalų tiekimo korekcijos (žr.3.1.4 skyrelį);
- Pirmo bandymo metu įranga sureguliuojama įprastu tokios sistemos reguliavimo būdu, kad variklis stabiliai dirbtų laisvais (~900 aps/min) ir vidutiniais (2000-3000 aps/min) sukiais be apkrovos;
- Antro bandymo metu benzino tiekimo EVB atjungiamas O_2 uždar.rat. degiojo mišinio korekcija, kad degiojo mišinio korekcija pagal deguonies jutiklį būtų vykdoma tik dujų tiekimo EVB;
- Trečio bandymo metu dujų tiekimo EVB atjungiamas korekcija pagal O_2 jutiklį; benzino tiekimo EVB pakeičiamos oro-degalų santykio korekcijos (žr.27 pav.) ir uždegimo paankstinimo kampo (žr.28 pav.) lentelės.

Išsiurbimo kolektoriaus slėgis, kPa	160	14.7	13.0	13.0	13.0	12.5	12.5	12.5	12.5
	135	14.7	13.5	13.5	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2
	113	14.7	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
	91	14.7	14.2	14.2	14.2	13.7	13.7	13.7	13.7
	70	a	14.7	15.0	15.0	14.8	14.0	14.0	14.0
	55	14.7	14.7	15.7	16.5	15.5	14.0	14.0	14.0
	40	14.0	14.7	15.7	16.5	15.5	14.0	14.0	14.0
	20	14.0	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5
	↳	700	1300	1700	2200	2800	3500	4700	5800
		Variklio apsukos, aps/min							

Išsiurbimo kolektoriaus slėgis, kPa	160	14.7	13.0	13.0	13.0	13.0	12.8	12.8	12.8
	135	14.7	13.5	13.5	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2
	113	14.7	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
	91	b	14.2	14.2	14.2	13.7	13.7	13.7	13.7
	70	14.7	15.5	16.5	16.5	16.0	14.0	14.0	14.0
	55	14.7	15.5	16.5	16.5	16.0	14.0	14.0	14.0
	40	14.7	15.5	16.5	16.5	16.0	14.0	14.0	14.0
	20	14.7	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5
	↳	700	1300	1700	2200	2800	3500	4700	5800
		Variklio apsukos, aps/min							

27 pav. AFR lentelės pakeitimai: a – antro bandymo metu naudojama lentelė, b – trečio bandymo metu naudojama lentelė

Oro-degalų santykis padidinamas bandant pasiekti geresnes degalų sąnaudas. 27 pav. lentelė naudojama kartu su O_2 jutiklio duomenimis benzino tiekimo EVB vykdamas O_2 uždar.rat. uždaro ciklo degiojo mišinio korekcija. Ji skirta reaguoti į nedidelius nukrypimus nuo pageidaujamo AFR ir negali būti naudojama kaip pagrindinis parametras sudarant degųjų mišinį dėl savo veikimo pobūdžio ir sąlyginai lėto veikimo. Degusis mišinys reguliuojamas keičiant VE lentelės duomenis (žr.21 pav.). Liesinant degųjų mišinį didėja mišinio degimo laikas, todėl reikia didinti mišinio uždegimo paankstinimo kampą, pakeitimai pateikti 28 pav.

Išsiurbimo kolektoriaus slėgis, kPa	160	20	20	20	20	22	22	24	24	24	25	26	26
	130	20	20	20	20	23	22	23	24	24	27	29	29
	115	20	20	20	23	24	26	26	26	26	26	29	29
	100	20	24	25	26	26	28	28	28	28	29	30	30
	87	28		25	26	28	30	30	30	30	31	32	32
	77	28	a	25	28	30	32	30	32	32	33	34	34
	67	28		26	28	32	34	32	32	33	33	34	34
	59	28		26	30	32	34	36	32	33	33	34	34
	53	27	22	27	32	34	36	36	34	32	32	34	36
	48	27	22	27	32	34	36	36	34	32	32	34	36
	44	27	20	27	32	34	36	36	34	32	32	34	36
	20	27	19	27	32	34	36	36	36	36	36	36	36
	λ	600	800	1300	1600	1900	2300	2700	3000	3500	4000	4800	5800
		Variklio apsukos, aps/min											

Išsiurbimo kolektoriaus slėgis, kPa	160	20	20	20	20	22	22	28	28	28	29	29	29
	130	20	20	20	20	23	25	26	29	29	29	31	31
	115	20	20	20	23	24	26	26	28	28	28	31	31
	100	20	24	25	26	26	28	28	28	28	29	30	30
	87	28		25	26	28	30	30	30	30	31	32	32
	77	28	b	25	28	30	36	36	32	32	33	34	34
	67	28		26	28	32	36	36	32	33	33	34	34
	59	28		26	30	32	36	36	32	33	33	34	34
	53	27	22	27	32	34	36	36	34	32	32	34	36
	48	27	22	27	32	34	36	36	34	32	32	34	36
	44	27	20	27	32	34	36	36	34	32	32	34	36
	20	27	19	27	32	34	36	36	36	36	36	36	36
	λ	600	800	1300	1600	1900	2300	2700	3000	3500	4000	4800	5800
		Variklio apsukos, aps/min											

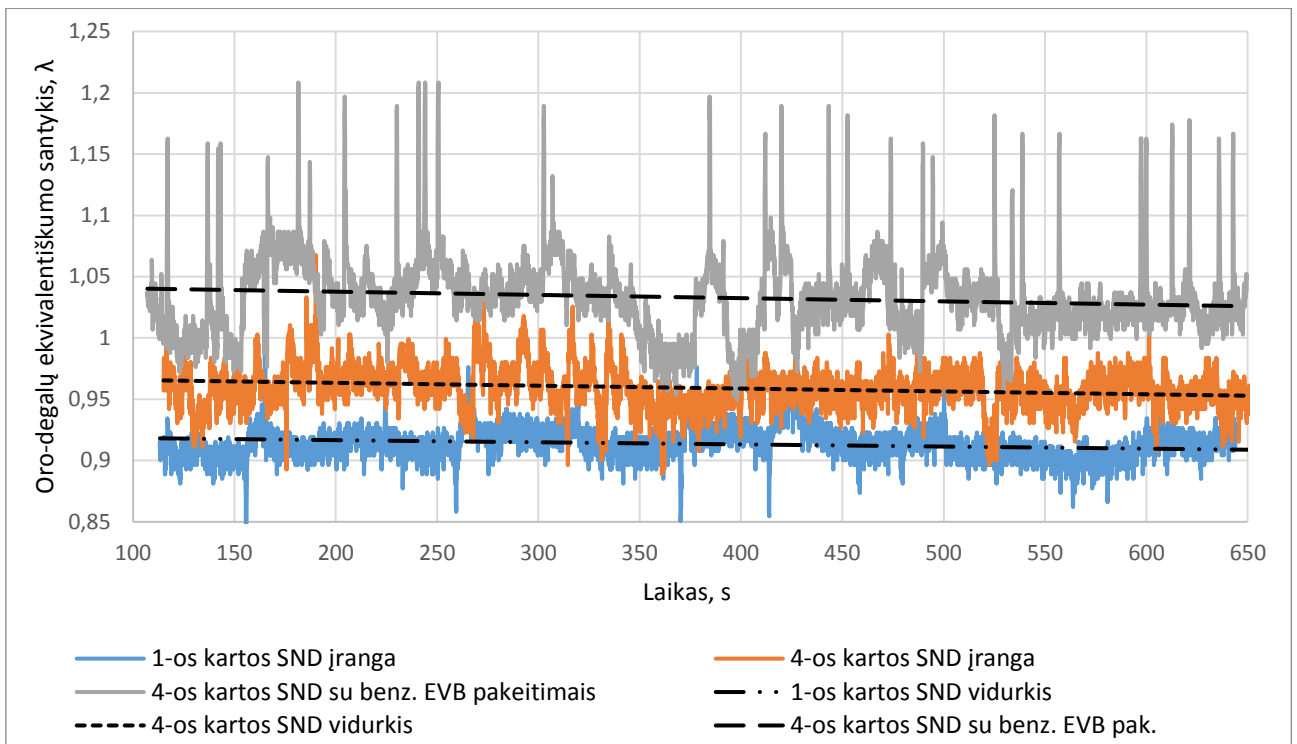
28 pav. Uždegimo paankstinimo lentelės pakeitimai: a – pirmo ir antro bandymu metu naudojama lentelė, b – trečio bandymo metu naudojama lentelė

27 ir 28 pav. lentelėse ovalu apibrauktos sritys, kuriose pakeisti parametrai skirtingų bandymų metu ir, kurios yra aktyvios stabiliai važiuojant ~100 km/h greičiu. Degalų sąnaudų rezultatai pateikti 5 lentelėje, jas skaičiuojant daroma prielaida, kad SND tankis – 0,55 kg/l, nuvažiuotas atstumas apskaičiuojamas iš benzino tiekimo sistemos EVB surinktų duomenų taip pat kaip skaičiuojant benzino sąnaudas.

5 lentelė. Dujų sąnaudų matavimo rezultatai

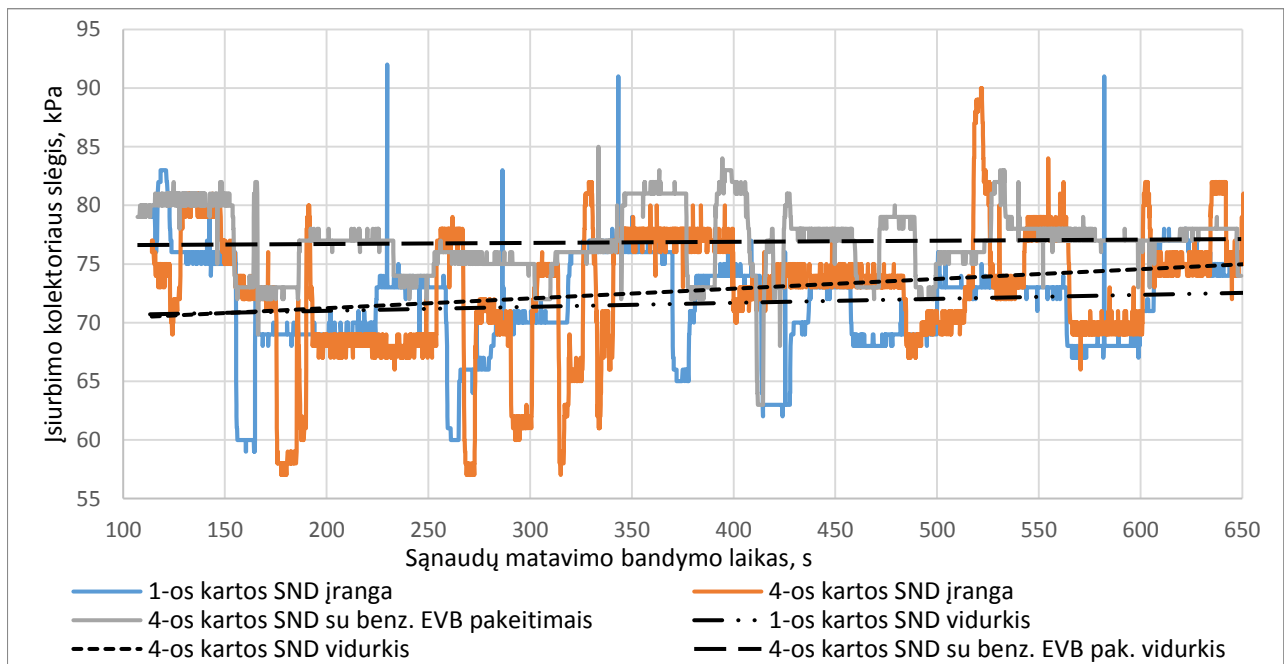
	Užpildyto degalų bako svoris, kg	Degalų bako svoris po bandymo, kg	Suvartotų degalų masė, kg	Apskaičiuotas suvartotų degalų tūris, l	Bandymo metu nuvažiuotas atstumas, km	Degalų sąnaudos, l/100km
1-os kartos SND įranga	35,190	34,174	1,016	1,847	14,95	12,36
4-os kartos SND įranga	36,504	35,606	0,898	1,633	14,83	11,01
4-os kartos SND įranga su benz. EVB pakeitimais	36,322	35,422	0,900	1,636	15,00	10,91

Kaip ir tiriant benzino sąnaudas, tikslinga pažvelgti į oro-degalų ekvivalentiškumo santykį bandymų metu, jie pateikti 29 pav. Naudojant 4-os kartos SND įranga su benzino įpurškimo EVB parametru pakeitimais matomi pikai parodo, kad mišinys nebebuvo stabiliai uždegamas ir į išmetimo sistemą pateko nesudegęs mišinys – fiksuojamas didelis deguonies kiekis. Fiksuojant liesesnį mišinį nei AFR lentelėje, benzino tiekimo EVB didina įpurškimo laiką diskretiškais žingsniais, kol nepasiekiamas mišinys nurodytas AFR lentelėje, o tai reiškia, kad momentaliai yra įpurškiamas didesnis nei reikalingas degalų kiekis. Vidutinės oro-degalų ekvivalentiškumo santykio reikšmės: 1-os kartos SND įranga – $\lambda \approx 0,91$; 4-os kartos SND įranga – $\lambda \approx 0,96$; 4-os kartos SND įranga su benzino įpurškimo EVB parametru pakeitimais – $\lambda \approx 1,03$.



29 pav. Oro-degalų ekvivalentiškumo santykiai SND sąnaudų tyrimo metu

Dar vienas parametras, kurį buvo galimybė sekti visų bandymų metu, yra įsiurbimo kolektoriaus slėgis (žr.30 pav.). Varikliui dirbant tokiomis pačiomis apskukomis (važiuojant vienodu greičiu), didesnis įsiurbimo kolektoriaus slėgis nurodo didesnę variklio apkrovą. Atsižvelgus į tai ir degalų sąnaudų rezultatus, galima daryti prielaidą, kad, esant didesniam vidutiniam įsiurbimo kolektoriaus slėgiui, variklio efektyvumas buvo didesnis.



30 pav. Įsiurbimo kolektoriaus slėgiai SND sistemų bandymu metu

Vidutinės MAP reikšmės: 1-as bandymas – 71,28 kPa; 2-as bandymas – 72,75 kPa; 3-as bandymas – 76,87 kPa.

4.2. Variklio galios tyrimas

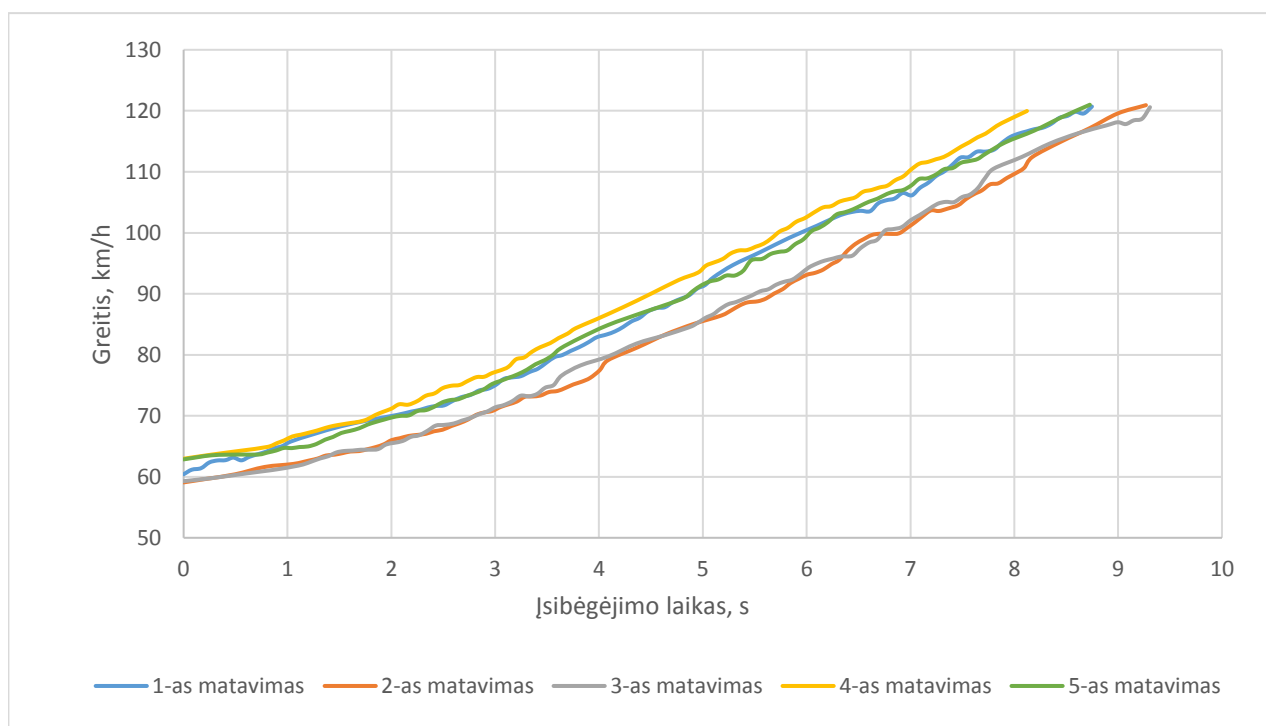
Tyrimo metu variklio galia tiesiogiai matuojama nebuvo. Variklio galia įvertinama ją paskaičiuojant iš automobilio įsibėgėjimo duomenų.

4.2.1. Įsibėgėjimo tyrimo metodika

Visi įsibėgėjimo bandymai buvo atlikti toje pačioje kelio atkarpoje, esant sausai kelio dangai, važiuojant trečia pavarą. Iš pradžių pasiekiamas ~60km/h greitis su minimaliai atidaryta droseline sklende, tada staigiai pilnai atidaroma droselinė sklendė ir leidžiama varikliui pasiekti maksimalias apsuкас. Prieš kiekvieną skirtingos degalų tiekimo sistemos bandymą SND bakas pilnai užpildomas degalais.

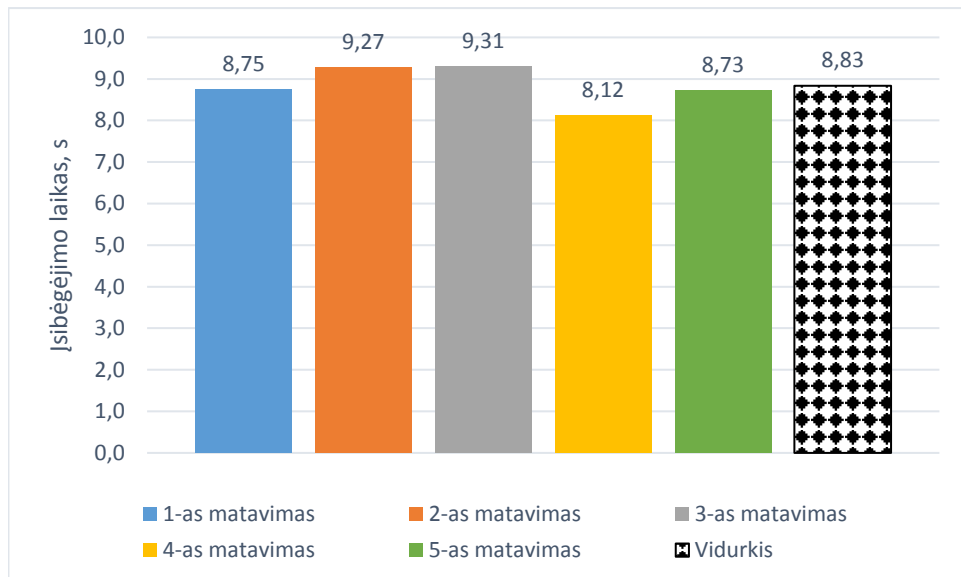
4.2.2. Įsibėgėjimo tyrimo rezultatai naudojant benzino įpurškimo sistemą

Penkių bandymų įsibėgėjimo rezultatai pateikti 30 ir 31 pav. Greitis apskaičiuojamas iš benzino EVB surinktų duomenų. Atskirų grafiko linijų nelygumas susidaro dėl EVB variklio apsuкас apskaičiavimo ypatumų. Grafikai apriboti iki 120km/h, nes esant ~127km/h variklis pasiekia maksimalias apsuкас ir EVB praleidinėja atsitiktinius uždegimo ciklus, kad neleisti toliau kilti variklio apsuкас.



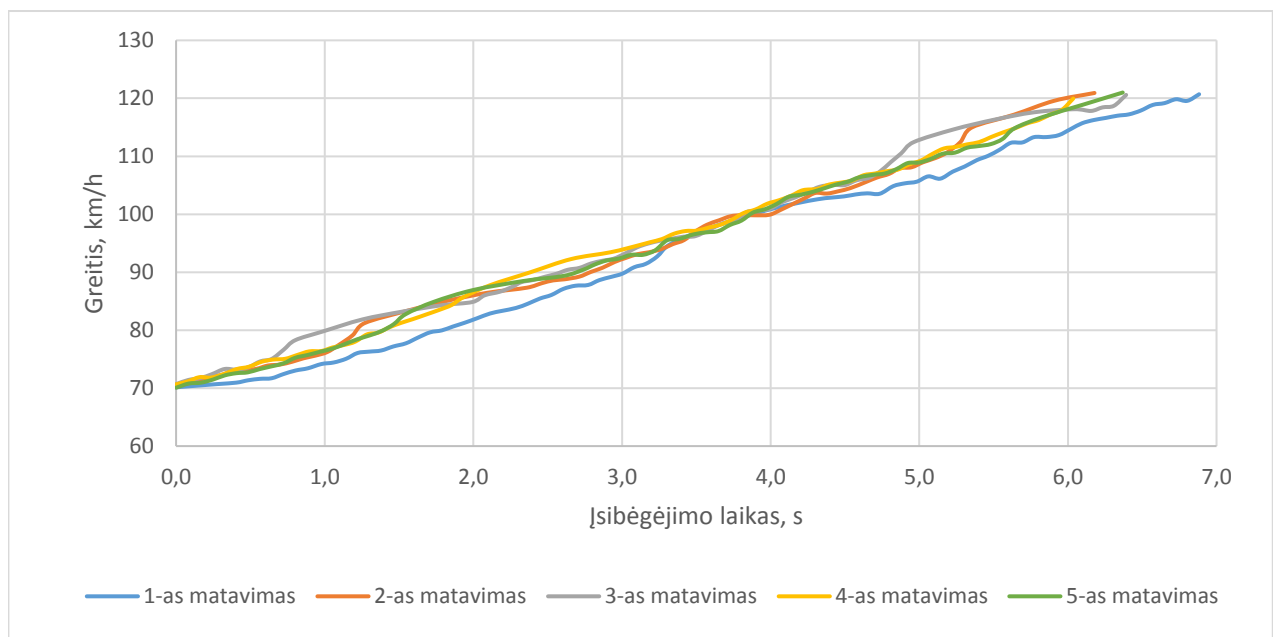
30 pav. 60-120km/h įsibėgėjimo rezultatai naudojant benzino įpurškimo sistemą

30 pav. matoma, kad visi grafikai turi beveik vienodą kylimo tendenciją ir reikšmingai nekerta vienas kito, tai parodo, kad įsibėgėjimo bandymai tarpusavy smarkiai nesiskyrė. Galutinėms įsibėgėjimo laiko reikšmėms (žr.31 pav.) didžiausią įtaką darė variacijos pradiniu bandymų momentu.



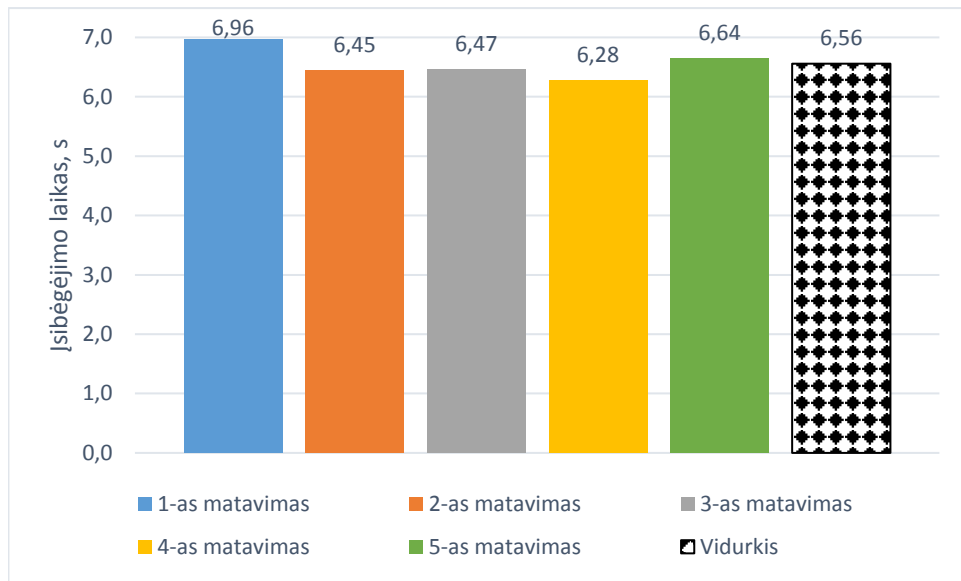
31 pav. 60-120km/h įsibėgėjimo laikai naudojant benzino įpurškimo sistemą

Įsibėgėjimo laikas geriau atspindimas atmetus pradinį laiką buvusias greičio variacijas ir pereinamąjį laikotarpį (~1 s) tarp minimaliai ir maksimaliai atidarytos droselinės sklendės (žr.32-33 pav.). Grafikai pertvarkomi, kad pradinis laiko momentas būtų automobiliui pasiekus 70km/h.



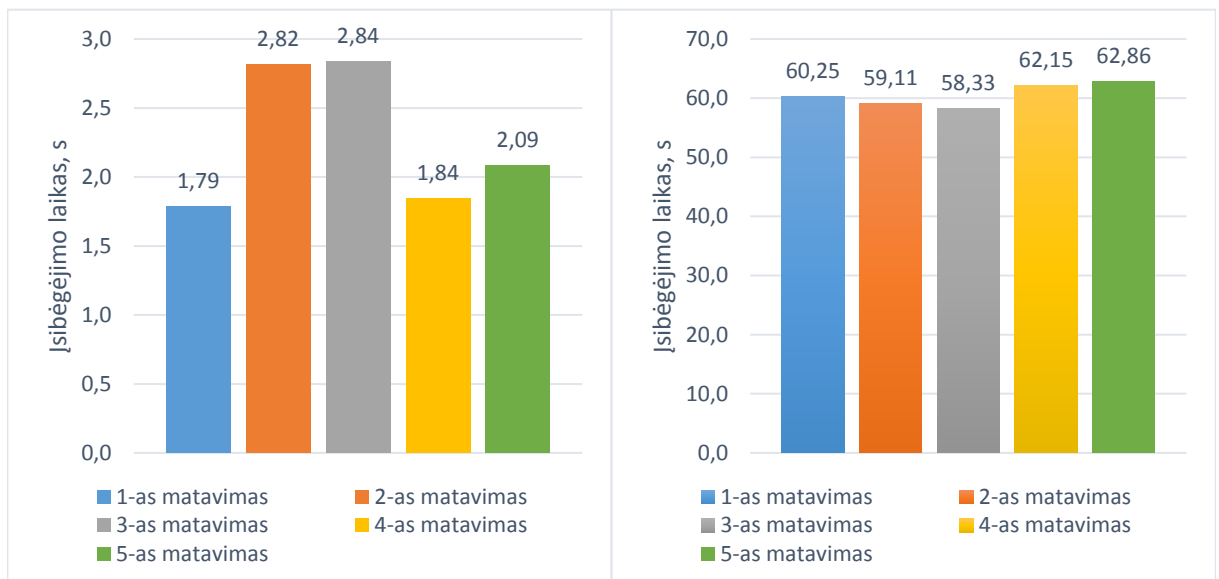
32 pav. 70-120km/h įsibėgėjimo rezultatai naudojant benzino įpurškimo sistemą

32-33 pav. matoma daug mažesnė įsibėgėjimo laikų sklaida. Įsibėgėjimo laikai nuo 70 iki 120km/h sudarė 79,5%; 69,6%; 69,3%; 77,3% ir 76,06% atitinkamai nuo kiekvieno 60-120km/h įsibėgėjimo laiko, tai reiškia, kad įsibėgėti pirmus 10 km/h užtruko 20,5-30,7% viso įsibėgėjimo laiko.



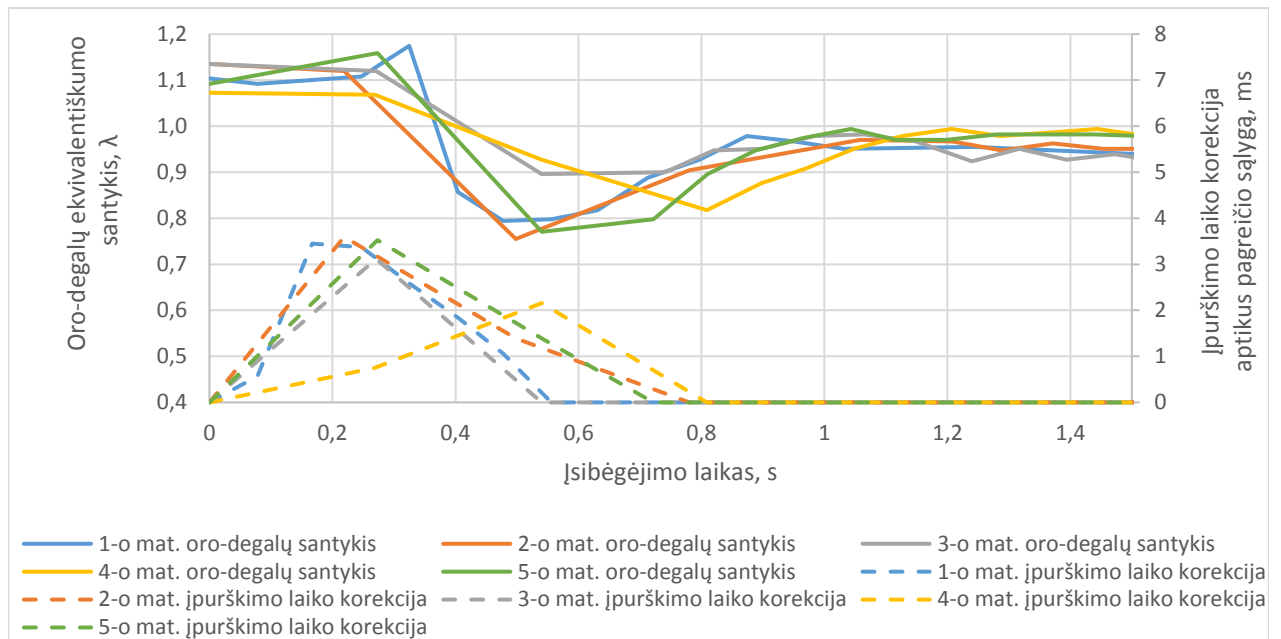
33 pav. 70-120km/h įsibėgėjimo laikai naudojant benzino įpurškimo sistemą

Pastebėta, kad įsibėgėjimas laikas nuo 60 iki 70 km/h ženkliai priklauso nuo pradinio greičio variacijos (žr.34 pav.).



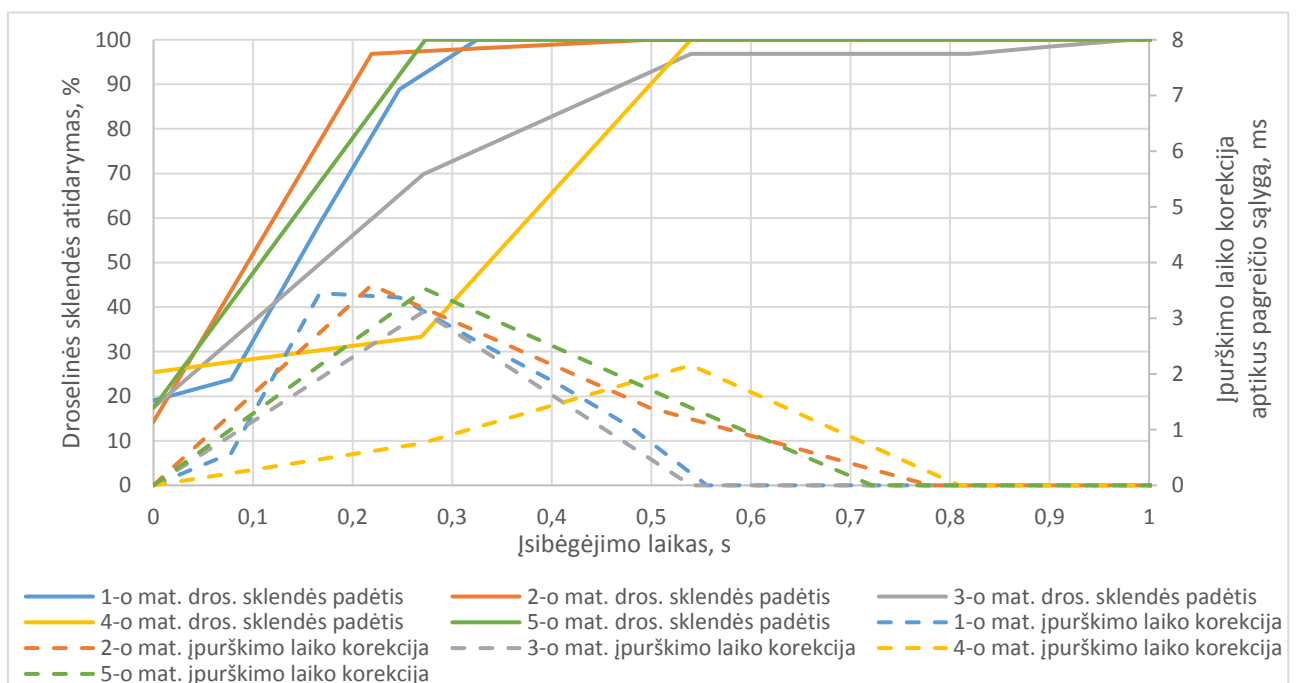
34 pav. 60-70 km/h įsibėgėjimo laiko priklausomybė nuo pradinio greičio naudojant benzino įpurškimo sistemą

Nevienodos sąlygos pradiniu laiko momentu sudaro didelius skirtumus 60-70 km/h įsibėgėjime. Važiuojant trečia pavara, pradinio greičio variacijos lemia variklio apsukų skirtumą tarp ~2650-2850 aps/min, o tai jau skirtingi VE lentelės regionai (žr. 21 pav.). Staigiai atidarant droselinę sklendę, suveikia *pagr.* korekcija (žr.7 lygt.), kurios paskirtis padidinti degalų įpurškimo laiką pereinamuoju laikotarpiu, kad mišinys netaptų liesas, 35 pav. pateikti oro-degalų santykio ir *pagr.* korekcijos pridedamo įpurškimo laiko grafikai.



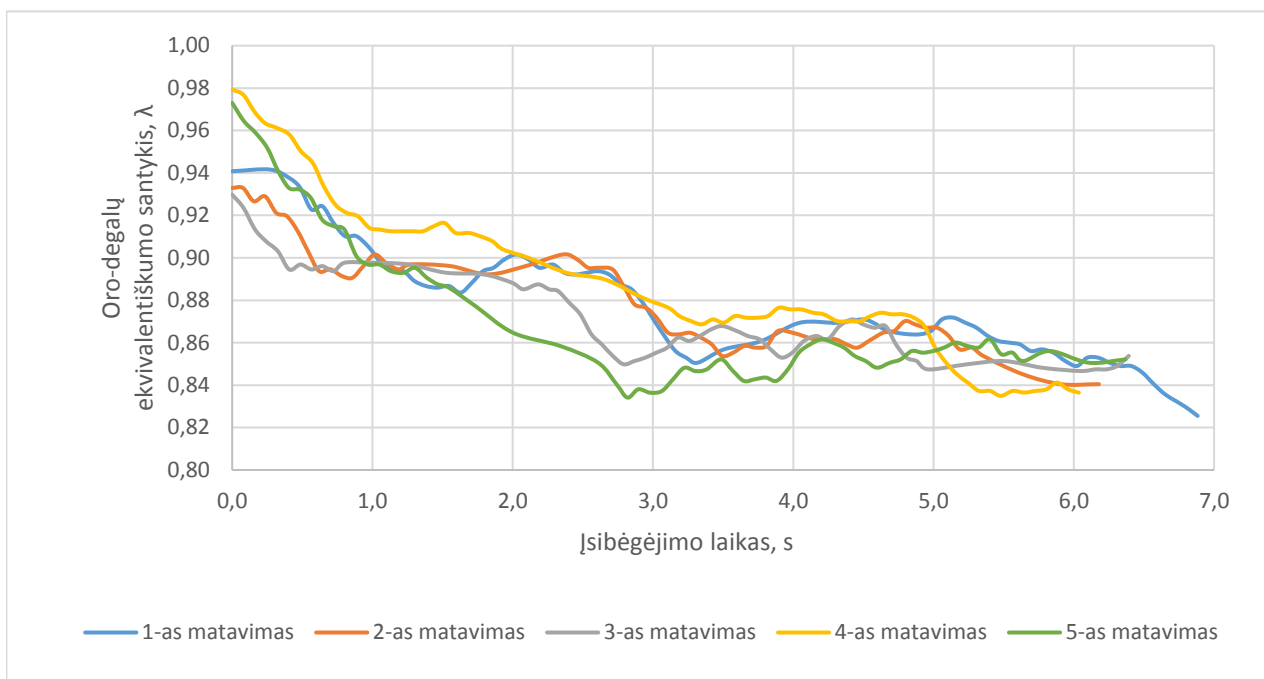
35 pav. AFR kitimas dėl pagreičio korekcijos veikimo naudojant benzino įpurškimo sistemą

35 pav. matoma, kad AFR reikšmės vėluoja lyginant su korekcijos suveikimo laiku apie 0,2 sekundės, tai vyksta dėl AFR matavimo pobūdžio – mišinys turi patekti į cilindrą, sudegti ir išmetamosios dujos per išmetimo kolektorių ir turbokompresorių turi pasiekti O₂ jutiklį, kad būtų užfiksuotas oro-degalų santykis. Oro-degalų santykis po *pagr.* korekcijos veikimo pabaigos stabilizuojasi ženkliai aukštesne reikšme nei korekcijos veikimo metu, tai rodo, kad maksimalus korekcijos pridedamas laikas yra per didelis, tą taip pat patvirtina 4 matavimo rezultatas. Idealiu atveju, korekcijos veikimo metu oro-degalų santykis turėtų išlikti stabilus. Šios korekcijos dydis priklauso nuo vartotojo įvestų duomenų ir droselinės sklendės padėties kitimo greičio (žr.36 pav.)



36 pav. Įpurškimo laiko korekcijos veikimo priklausomybė nuo TPS kitimo greičio naudojant benzino įpurškimo sistemą

Tolimesniuose įsibėgėjimo tyrimo rezultatuose įsibėgėjimo laikas nuo 60 iki 70 km/h nebus pateikiamas dėl pradinių parametrų jautrumo bendram įsibėgėjimo laikui, bet bus pateikiami oro-degalų santykio grafikai, kad įvertinti tiekimo sistemų veikimą pereinamuoju variklio apkrovos periodu. Oro-degalų santykiai 70-120km/h įsibėgėjimo metu patiekti 37 pav.



37 pav. Oro-degalų ekvivalentiškumo santykiai 70-120km/h įsibėgėjimo metu naudojant benzino įpurškimo sistemą

37 pav. matoma, kad įsibėgėjant, didėjant variklio apsuksams ir apkrovai, oro-degalų santykis palaipsniui mažėja iki $\lambda \approx 0,85$, tai paprastai yra optimalus mišinys pasiekti maksimalią variklio galią. Pateikti grafikai yra perskaičiuoti kiekvienam laiko momentui imant 5 reikšmių vidurkį, kad aiškiau būtų matomos oro-degalų santykio kitimo tendencijos. Pirmo bandymo grafikų skirtumas pateiktas 38 pav.

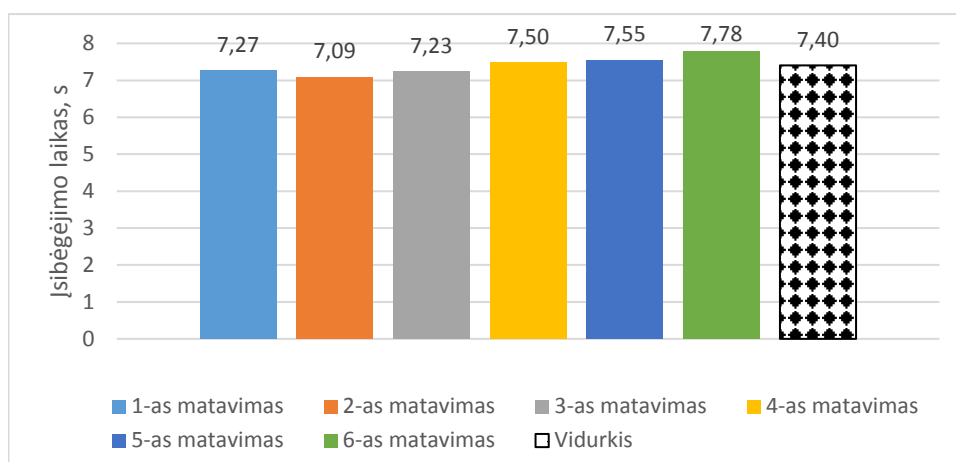


38 pav. Fiksuotos ir apskaičiuotos vidutinės oro-degalų ekvivalentiškumo santykio reikšmės

SND tiekimo sistemų bandymų oro-degalų santykio grafikai 70-120km/h įsibėgėjimo metu bus pateikti imant 5 AFR reikšmių vidurkį kiekvienam laiko taškui.

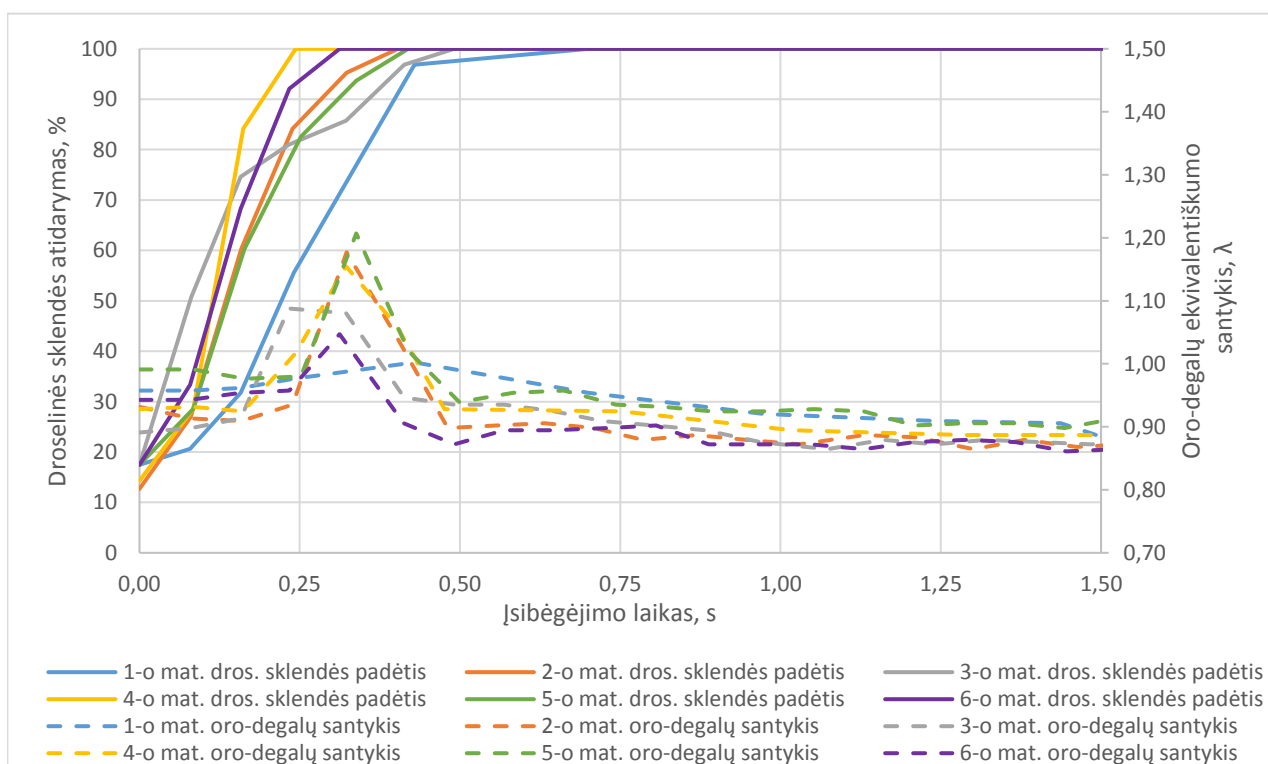
4.2.3. Įsibėgėjimo tyrimo rezultatai naudojant SND tiekimo sistemas

SND sistemų bandymų sąlygos aprašytos 4.1.3 skyrelyje. Bandymai atlikti taip pat kaip važiuojant benzinu ir dėl anksčiau išvardintų priežasčių rezultatai pateikiami įsibėgint nuo 70 iki 120km/h. Įsibėgėjimo rezultatai varikliui naudojant 1-os kartos SND tiekimo įrangą pateikti 39 pav.



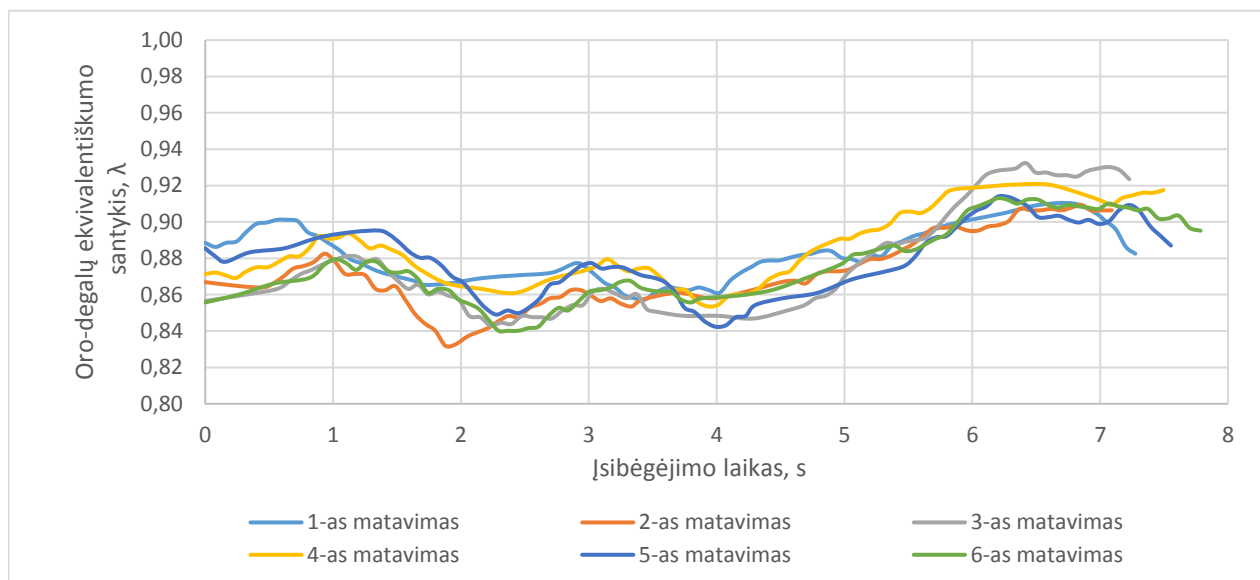
39 pav. Įsibėgėjimo nuo 70 iki 120km/h rezultatai naudojant SND 1-os kartos įrangą

39 pav. pateikti įsibėgėjimo laikai yra nuo 0,13 iki 1,5 sekundės ilgesni nei naudojant benzino įpurškimą. 1-os kartos SND įrangą reguliuoja degalų tiekimą tik pagal slėgį įsiurbimo kolektoriuje ir turi ženklų degalų tiekimo inertiškumą, staigiai atidarius droselinę sklendę, sistema negali greitai kompensuoti padidėjusio oro srauto ir degusis mišinys tampa liesas, tai matoma 40 pav. Parametrai fiksuoti benzino EVB pagalba.



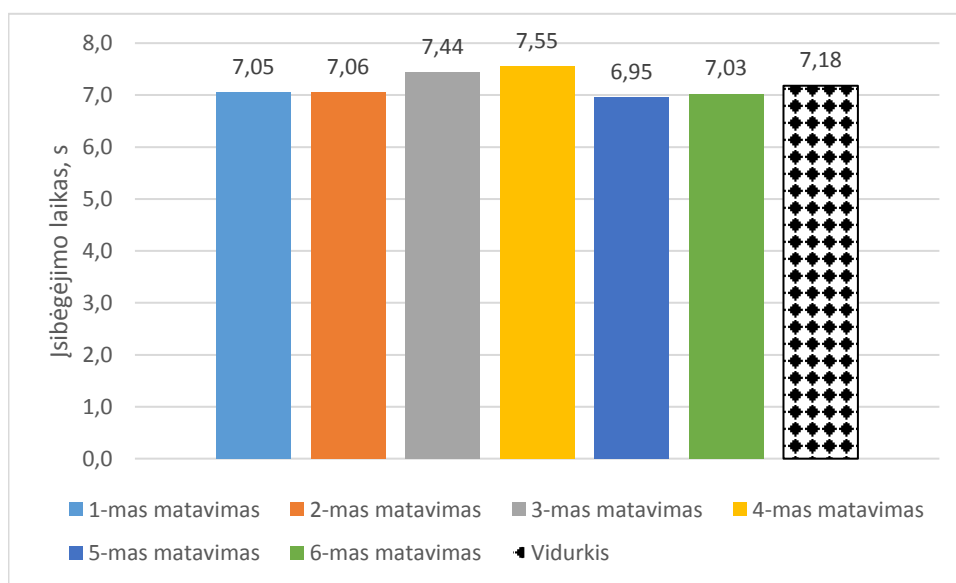
40 pav. Oro-degalų ekvivalentiškumo santykiai ir droselinės sklendės padėtis 60-70 km/h įsibėgėjimo pradžioje naudojant 1-os kartos SND įrangą

40 pav. oro-degalų santykis pakilo nuo $\lambda = 0,99$ iki $\lambda = 1,21$ blogiausiu atveju antro matavimo metu. Pirmo matavimo metu droselinė sklendė buvo ženkliai lėčiau atidaryta nuo pradinės padėties iki 100%, tai reiškia, kad sistema turėjo daugiau laiko sureaguoti į degalų poreikio pasikeitimą ir oro-degalų santykis pakilo nuo $\lambda = 0,95$ iki $\lambda = 1,02$ pirmo bandymo metu. Oro-degalų ekvivalentiškumo santykiai 70-120km/h įsibėgėjimo metu pateikti 41 pav.



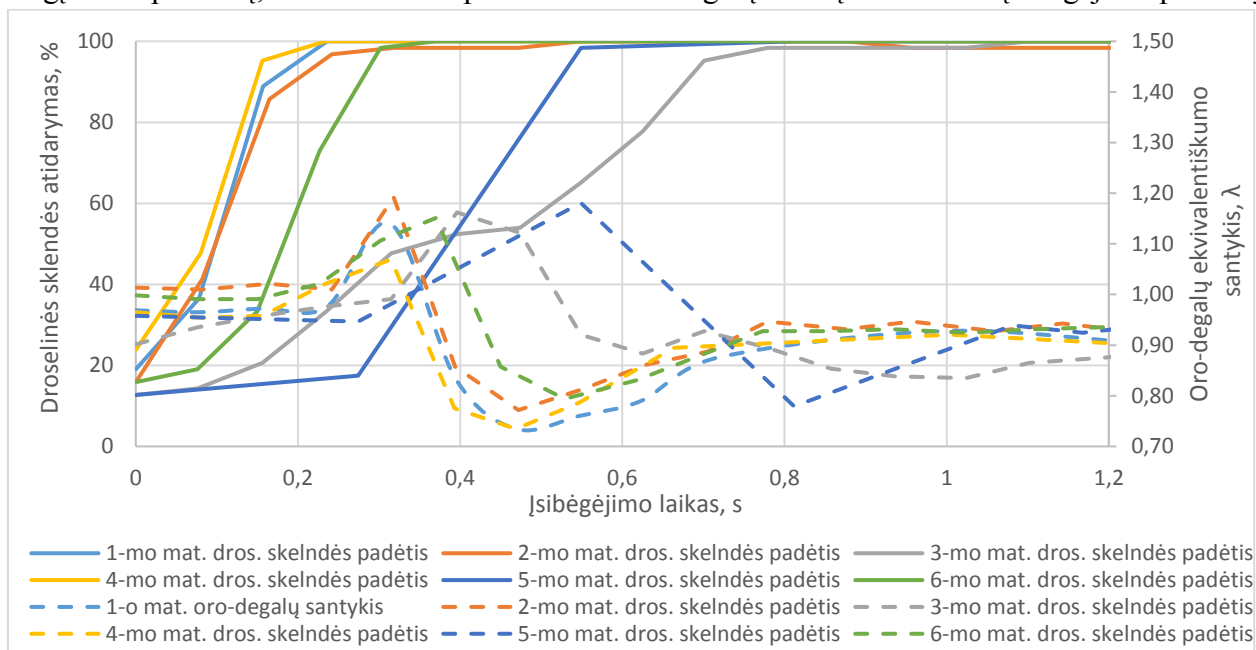
41 pav. Oro-degalų ekvivalentiškumo santykiai 70-120 km/h įsibėgėjimo metu naudojant 1-os kartos SND įrangą

41 pav. matoma, kad oro-degalų ekvivalentiškumo santykis po 4 sekundžių ima didėti ir pasiekia reikšmę $\lambda \approx 0,91$, tai nepageidautina ir galimai pavojinga. Per liesas degusis mišinys apriboja maksimalią variklio galią; gali sukelti degiojo mišinio detonaciją ir didina išmetamųjų dujų temperatūrą.



42 pav. Įsibėgėjimo nuo 70 iki 120km/h rezultatai naudojant SND 4-os kartos įrangą

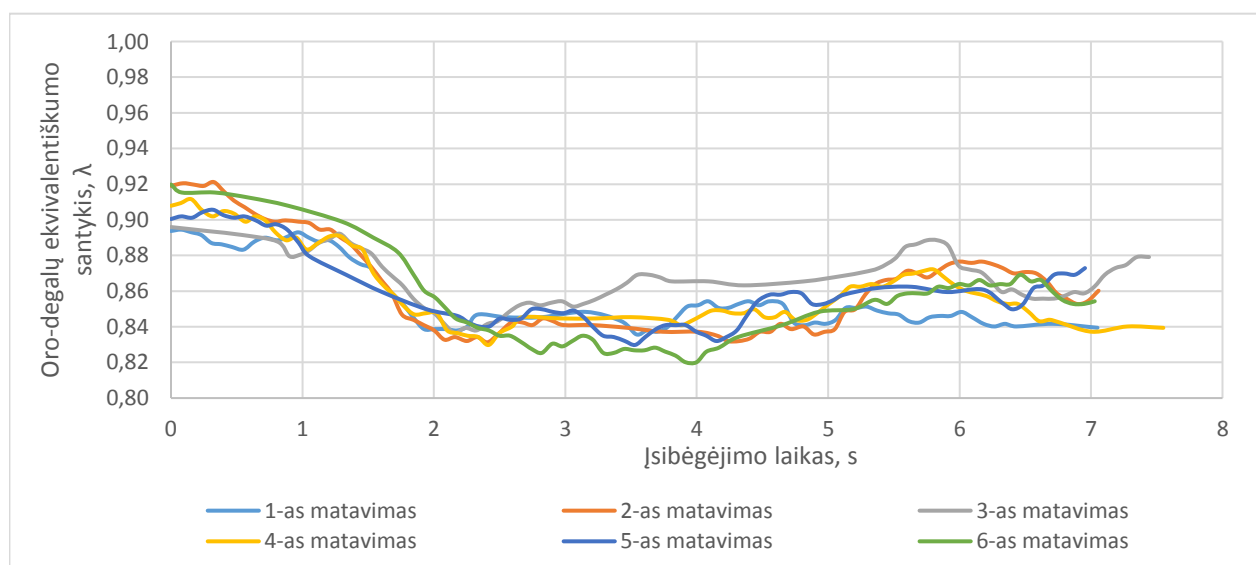
42 pav. matoma, kad naudojant ketvirtos 4-os kartos SND tiekimo įrangą, įsibėgėjimo laikai buvo lygus arba iki 1,27 sekundės ilgesni nei naudojant benzino įpurškimą. 4-os kartos SND įranga iš esmės kartoja tai, ką daro benzino EVB, ir pritaiko reikalingas įpurškimo laiko korekcijas pagal dujų slėgį ir temperatūrą, tai matoma 43 pav. stebint oro-degalų mišinį 60-70km/h įsibėgėjimo pradžioje.



43 pav. AFR ir TPS 60-70 km/h įsibėgėjimo pradžioje naudojant 4-os kartos SND įrangą

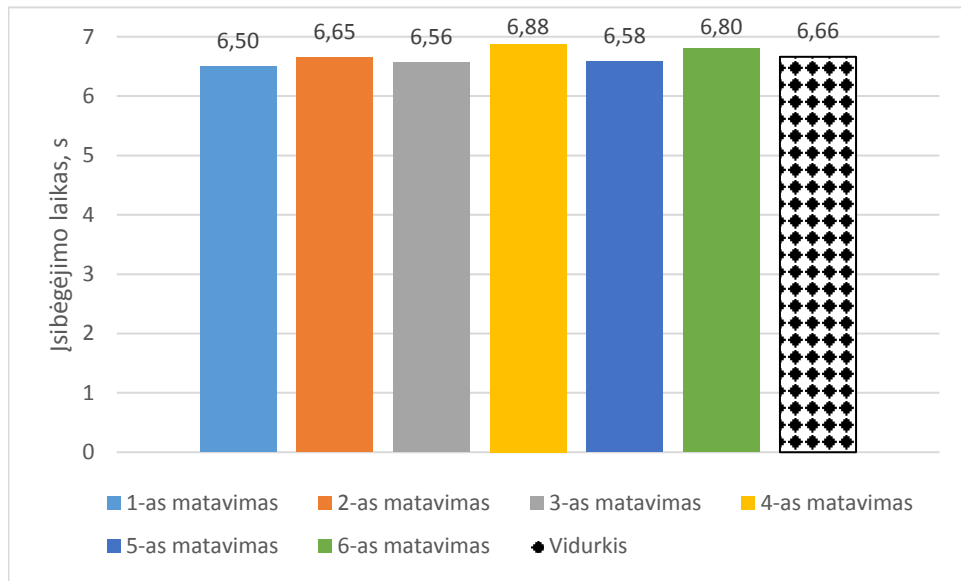
Kadangi dujų įrangos valdymo EVB naudoja benzino EVB degalų purkštukų valdymo signalus, dujų purkštukų valdymui taikoma tokia pat pagreičio korekcija (žr.35 pav.). 43 pav. matoma, kad oro-degalų santykis iš pradžių padidėja, o po to kinta panašiai kaip naudojant benzino įpurškimo sistemą. Tai parodo, kad, varikliui naudojant SND, pradinė pagreičio korekcijos pridedamo įpurškimo laiko reikšmė turėtų būti didesnė, o bendras korekcijos veikimo laikas trumpesnis, kad išlaikyti stabilų oro-degalų mišinį.

44 pav. pateiktas oro-degalų mišinio kitimas 70-120 km/h įsibėgėjimo metu.



44 pav. Oro-degalų ekvivalentiškumo santykiai 70-120 km/h įsibėgėjimo metu naudojant 4-os kartos SND įrangą

44 pav. matoma, kad oro-degalų santykis mažėja iki $\lambda \approx 0,83$ ir pradeda didėti iki $\lambda \approx 0,86$. Šių bandymų metu benzino tiekimo EVB buvo atjungta O_2 uždar.rat. degiojo mišinio korekcija, bet O_2 jutiklio signalas prijungtas SND tiekimo EVB, todėl galima daryti prielaidą, kad SND tiekimo EVB koreguoja dujų purkštukų atidarymo laiką, kad pasiekti liesesnį mišinį.



45 pav. Išibėgėjimo nuo 70 iki 120km/h rezultatai naudojant SND 4-os kartos įrangą ir papildomai keičiant benzino EVB parametrus

45 pav. matoma, kad išibėgėjimo laikas varikliui veikiant su 4-os kartos SND įranga, kai papildomai pakeisti benzino EVB parametrai, buvo nuo 0,6 sekundės ilgesnis iki 0,46 sekundės trumpesnis nei naudojant benzino įpurškimą ir iki 1,05 sekundės trumpesnis nei naudojant 4-os kartos SND įrangą be benzino EVB parametru pakeitimų. Benzino EVB pakeisti parametrai pateikti 46 pav.

Išurbimo kolektoriaus slėgis, kPa	Variklio apsuksos, aps/min								
	700	1300	1700	2200	2800	3500	4700	5800	
160	14.7	13.0	13.0	13.0	12.5	12.5	12.5	12.5	
135	14.7	13.5	13.5	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	
113	14.7	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	
91	14.2	14.2	14.2	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	
70	14.7	15.0	15.0	14.8	14.0	14.0	14.0	14.0	
55	14.0	14.7	15.7	16.5	15.5	14.0	14.0	14.0	
40	14.0	14.7	15.7	16.5	15.5	14.0	14.0	14.0	
20	14.0	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	
↳	700	1300	1700	2200	2800	3500	4700	5800	

Išurbimo kolektoriaus slėgis, kPa	Variklio apsuksos, aps/min								
	700	1300	1700	2200	2800	3500	4700	5800	
160	14.7	13.0	13.0	13.0	13.0	12.8	12.8	12.8	
135	14.7	13.5	13.5	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	
113	14.7	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	
91	14.2	14.2	14.2	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	
70	15.5	16.5	16.5	16.0	14.0	14.0	14.0	14.0	
55	14.7	15.5	16.5	16.5	16.0	14.0	14.0	14.0	
40	14.7	15.5	16.5	16.5	16.0	14.0	14.0	14.0	
20	14.7	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	
↳	700	1300	1700	2200	2800	3500	4700	5800	

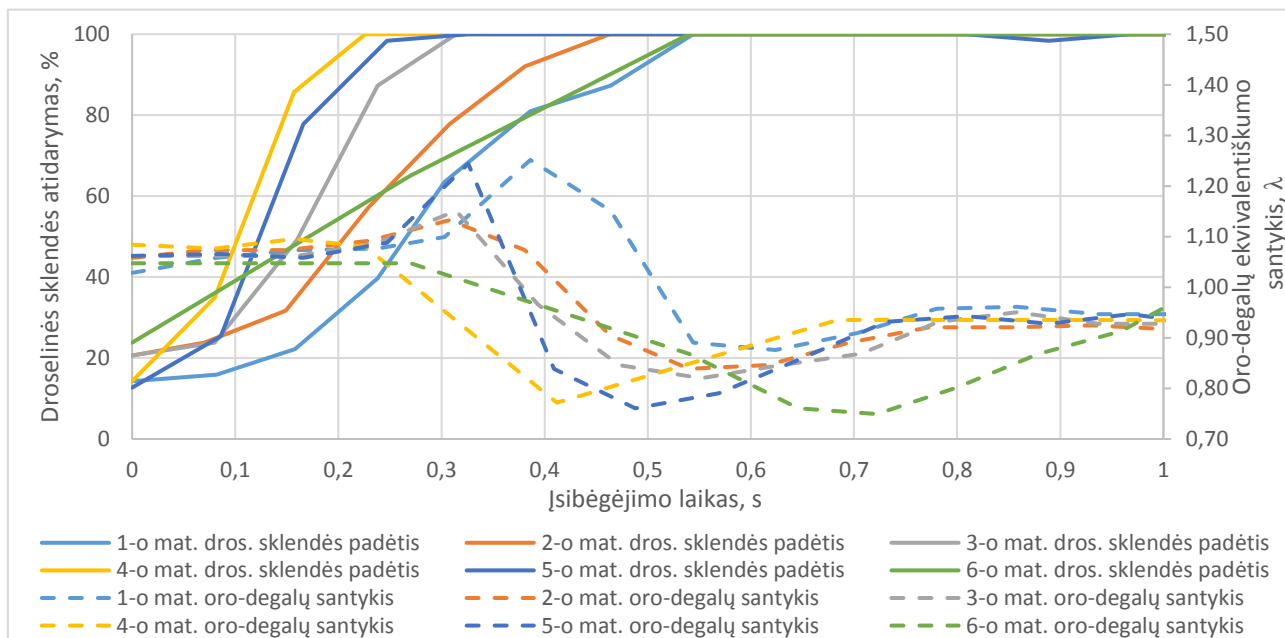
Išurbimo kolektoriaus slėgis, kPa	Variklio apsuksos, aps/min											
	600	800	1300	1600	1900	2300	2700	3000	3500	4000	4800	5800
160	20	20	20	20	22	22	24	24	25	26	26	
130	20	20	20	20	23	22	23	24	24	27	29	29
115	20	20	20	23	24	26	26	26	26	29	29	29
100	20	24	25	26	26	28	28	28	29	30	30	30
87	28	24	25	26	28	30	30	30	30	31	32	32
77	28	25	28	30	32	30	32	32	33	34	34	34
67	28	26	28	32	34	32	32	33	33	34	34	34
59	28	26	30	32	34	36	32	33	33	34	34	34
53	27	22	27	32	34	36	36	34	32	32	34	36
48	27	22	27	32	34	36	36	34	32	32	34	36
44	27	20	27	32	34	36	36	34	32	32	34	36
20	27	19	27	32	34	36	36	36	36	36	36	36
↳	600	800	1300	1600	1900	2300	2700	3000	3500	4000	4800	5800

Išurbimo kolektoriaus slėgis, kPa	Variklio apsuksos, aps/min											
	600	800	1300	1600	1900	2300	2700	3000	3500	4000	4800	5800
160	20	20	20	20	22	22	28	28	28	29	29	29
130	20	20	20	20	23	25	26	29	29	29	31	31
115	20	20	20	23	24	26	26	28	28	28	31	31
100	20	24	25	26	26	28	28	28	28	29	30	30
87	28	24	25	26	28	30	30	30	30	30	31	32
77	28	24	25	28	30	36	36	32	32	33	34	34
67	28	23	26	28	32	36	36	32	33	33	34	34
59	28	23	26	30	32	36	36	32	33	33	34	34
53	27	22	27	32	34	36	36	34	32	32	34	36
48	27	22	27	32	34	36	36	34	32	32	34	36
44	27	20	27	32	34	36	36	34	32	32	34	36
20	27	19	27	32	34	36	36	36	36	36	36	36
↳	600	800	1300	1600	1900	2300	2700	3000	3500	4000	4800	5800

46 pav. Oro-degalų santykio ir uždegimo paankstinimo kampo pakeitimai. a, c – pradiniai parametrai; b, d – pakeisti parametrai

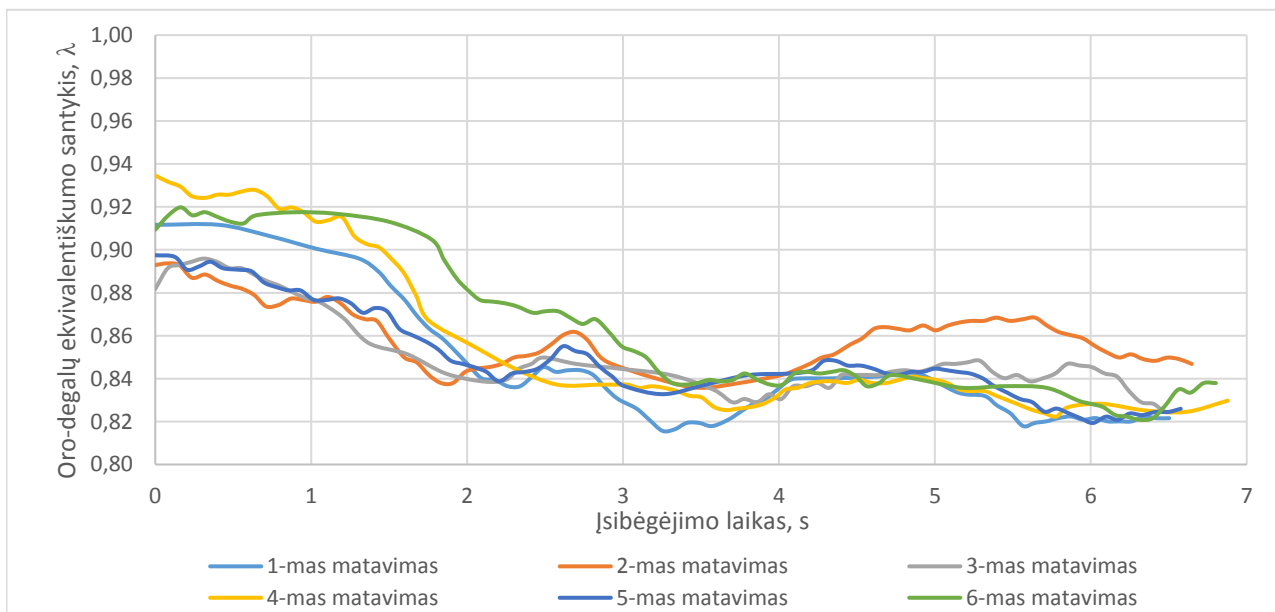
46 pav. oro-degalų santykis pasirinktas didesnis atsižvelgiant į stochiometrinį SND mišinį, kuris yra didesnis už benzino. Uždegimo paankstinimo kampas padidintas atsižvelgiant į didesnį SND oktaniinį skaičių.

47 pav. pateiktas oro-degalų santykis 60-70 km/h įsibėgėjimo pradžioje. Oro-degalų santykio kitimas beveik toks pat kaip bandymuose vien su 4-os kartos SND tiekimo įranga (žr.43 pav.), kadangi tose oro-degalų santykio ir uždegimo paankstinimo kampo lentelių srityse parametrai nepakeisti.



47 pav. AFR ir TPS 60-70 km/h įsibėgėjimo pradžioje naudojant 4-os kartos SND įrangą ir papildomai keičiant benzino EVB parametrus

48 pav. matoma, kad oro-degalų santykis keitėsi panašiai kaip važiuojant benzinu (žr.37 pav.) ir reikšmės bandymų gale yra šiek tiek didesnės, tai atitinka padarytus pakeitimus (žr.46 pav.).



48 pav. Oro-degalų ekvivalentiškumo santykiai 70-120 km/h įsibėgėjimo metu naudojant 4-os kartos SND įrangą ir papildomais benzino EVB parametru pakeitimais

47-48 pav. matomų bandymų metu O₂ jutiklio signalas nebuvo pajungtas į SND tiekimo EVB, o benzino tiekimo EVB buvo įjungta O₂ uždar.rat. (žr.8 lygt.) degiojo mišinio korekcija.

4.2.4. Variklio galios skaičiavimas

Vidutinė variklio galia vatais apskaičiuojama iš benzino EVB surinktų duomenų remiantis (14) lygtimi.

$$\bar{P} = F\bar{v} = m\bar{a} * \bar{v} = m \frac{\Delta v}{\Delta t} * \frac{v_i + v_f}{2} \quad (14)$$

Kur:

m – automobilio masė, kg

Δv – greičio pokytis, m/s

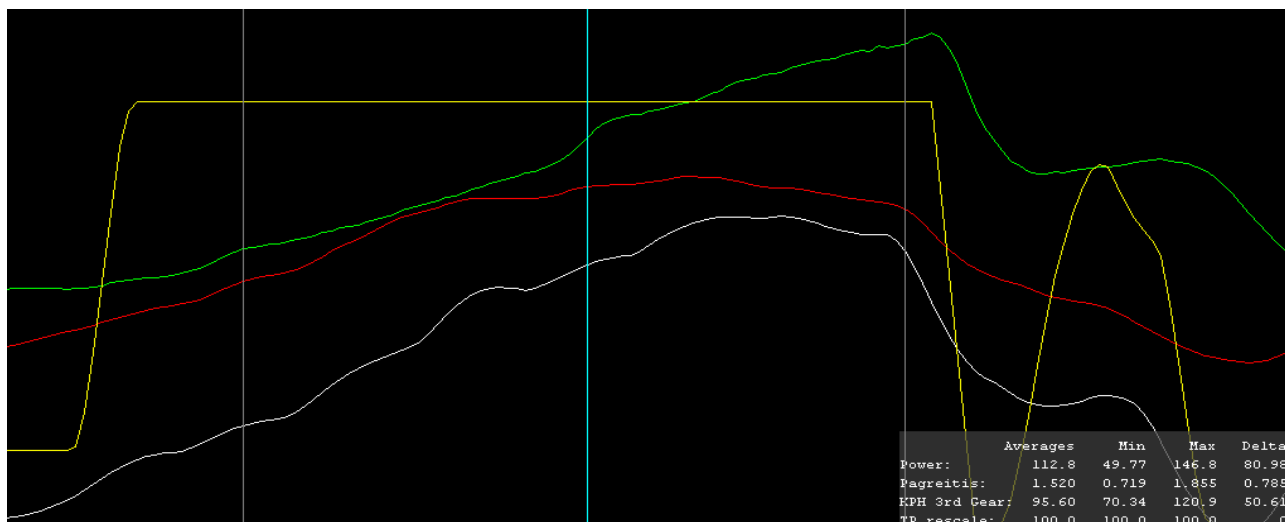
Δt – laiko pokytis, s

v_i – pradinis greitis, m/s

v_f – galutinis greitis, m/s

Automobilio gamyklinė masė – 1025kg, tačiau, dėl perdarymų ir sumontuotų papildomų degalų sistemų, daroma prielaida, kad automobilio masė 1200kg.

Naudojant „MegaLogViewer HD“ programą pagal (14) lygtį apskaičiuojama galia kiekvienu laiko momentu ir sudaromi grafikai (žr.49 pav.).



49 pav. Apskaičiuoto greičio 3 pavara (—), pagreičio (—) ir galios (balta kreivė) grafikai bei droselinės sklendės padėtis (—) vieno bandymo metu

49 pav. matomuose grafikuose „MegaLogViewer HD“ programoje pažymėję dominančią sritį gauname lentelę su mažiausia, didžiausia, vidutine kiekvieno iš grafikų reikšme ir pokyčiu. Taip atrandama maksimalios galios reikšmė kiekvienam iš įsibėgėjimo bandymų. Rezultatai pateikiami 6 lentelėje.

6 lentelė. Galios skaičiavimo rezultatai

Matavimo numeris	Galia - benzino įpurškimas, kW	Galia - 1-os kartos SND sistema, kW	Galia - 4-os kartos SND sistema, kW	Galia - 4-os kartos SND su benzino EVB parametru pakeitimu, kW
1	109,5	95,7	108,9	113,6
2	110,1	102,5	103,4	111,4
3	113,1	99,3	101,3	112,1
4	108,3	102,0	100,1	104,8
5	113,9	98,9	108,5	112,1
6	-	97,7	109,8	112,3
Vidurkis	110,98	99,35	105,33	111,05

SND tiekimo sistemų vidutinė apskaičiuota visų bandymų galia buvo 10,48% ir 5,09% mažesnė nei benzino naudojant 1-os ir 4-os kartos sistemas atitinkamai ir praktiškai tokia pat naudojant 4-os kartos SND tiekimo sistemą ir pakeičiant benzino EVB parametrus.

4.3. Žalingų išmetamųjų dujų emisijų matavimas

Žalingos išmetamųjų dujų emisijos matuotos dujų analizatoriumi „Tecnomotor 810“, kurio savybės pateiktos 7 lentelėje.

7 lentelė. Dujų analizatoriaus techniniai duomenys [20]

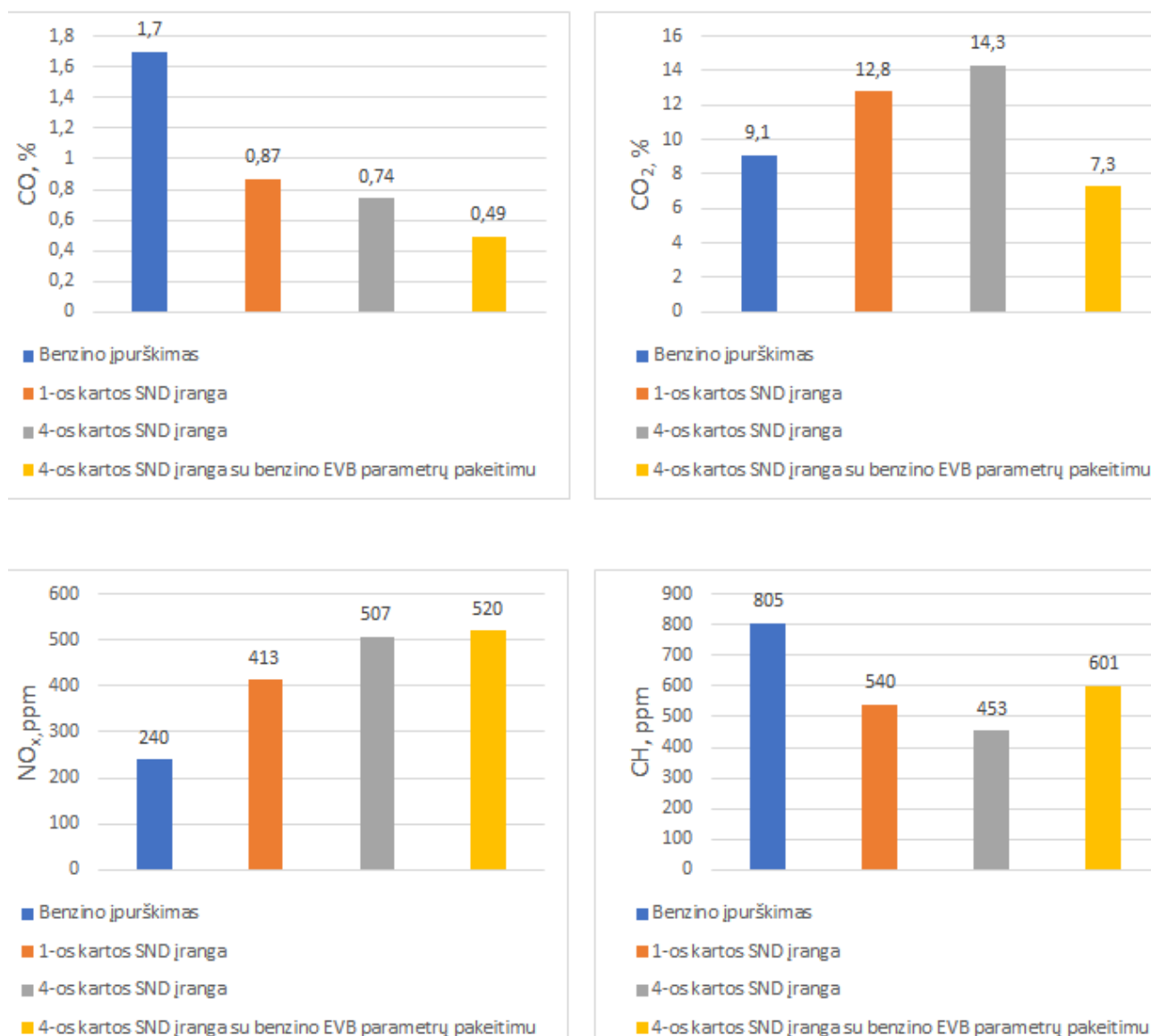
Emisija	Matavimo ribos	Tikslumas
CO	0 – 10 %	0,01 %
CO ₂	0 – 20 %	0,1 %
CH	0 – 20000 ppm	1 ppm
NO _x	0 – 5000 ppm	1 ppm

Visi emisijų matavimai atlikti varikliui dirbant laisvomis apsukomis, pasiekus stabilią darbinę temperatūrą ir išjungus visus papildomus automobilio elektros įrenginius. Naudojant 4-os kartos SND įrangą buvo atlikti du matavimai: pirmas matavimas atliktas nekeičiant benzino įpurškimo EVB parametru; antras – pakeičiant benzino įpurškimo EVB uždegimo paankstinimo kampą. Variklio darbo parametrai kiekvieno matavimo metu pateikti 8 lentelėje.

8 lentelė. Variklio darbo parametrai emisijų matavimo metu

	Benzino įpurškimas	1-os kartos SND įranga	4-os kartos SND įranga	4-os kartos SND su benzino EVB parametru pakeitimu
Apsukos, aps/min	950-980	830-860	900-930	780-830
Įsiurbimo kolektoriaus slėgis, kPa	43-44	48-49	44-46	51-53
Uždegimo paankstinimo kampas, °BTDC	18	18	18	22
Oro-degalų ekvivalentiškumo santykis, λ	0,86-0,88	0,89-0,94	0,94-0,95	0,98-1,01

8 lentelėje matoma, kad emisijų matavimų metu buvo skirtingi variklio darbo parametrai. Droselinės sklendės atidarymas ir uždegimo paankstinimo kampas visų bandymų metu nebuvo keičiamas. Mažesnis išsiurbimo kolektoriaus slėgis kartu su aukštesnėmis apsukomis nurodo, kad variklis dirbo mažesne apkrova. Varikliui dirbant laisvais sūkliais pageidautina kuo mažesnė variklio apkrova (stabilesnis darbas), kad variklis turėtų rezervą padidėjusiai apkrovai dėl papildomos įrangos veikimo (šviesos, aušinimo ventiliatoriai, oro kondicionierius, langų šildymas ir t.t.), priešingu atveju variklio apsukos gali tiek sumažėti, kad variklis užges. Žalingos emisijos yra tiesiogiai priklausomos nuo oro-degalų santykio, kuriuo variklis dirba [4, 6]. Emisijų matavimo rezultatai pateikti 50 pav.



50 pav. Išmetamųjų dujų emisijų matavimo rezultatai

Lyginant benzino įpurškimą ir 1-os bei 4-os kartos SND įrangą, išaugusios CO₂ emisijos bendrai rodo geriau vykstantį degimo procesą, CO emisijos mažėja didėjant oro-degalų santykiui, kadangi degimo metu yra daugiau laisvo deguonies ir CO gali toliau oksiduotis iki CO₂; NO_x emisijos didėja didėjant oro-degalų ekvivalentiškumo santykiui dėl didesnio deguonies kiekio ir didėjančios degimo temperatūros; CH emisijos priklauso nuo degalų rūšies ir paprastai mažėja didėjant oro-degalų ekvivalentiškumo santykiui, kadangi lieka mažiau nesudegusių degalų.

Lyginant tarpusavy matavimus su 4-os kartos SND įranga, pastebėta, kad, padidinus uždegimo paankstinimo kampą, oro-degalų ekvivalentiškumo santykis pakilo nuo $\lambda \approx 0,95$ iki $\lambda \approx 0,99$ dėl padidėjusio mišinio degimo laiko, tačiau variklio darbas tapo juntamai mažiau tolygus. Iš išaugusių CH ir sumažėjusių CO₂ emisijų galima daryti prielaidą, kad degusis mišinys nebebuvo stabiliai uždegamas, tačiau oro-degalų santykio kreivėje nebuvo matomi charakteringi pikai, kai įvyksta uždegimo pertrūkiai (žr. 29 pav.).

Automobiliams su kibirkštinio uždegimo varikliais, kuriuose nėra įrengti išmetamųjų dujų katalizatoriai, Lietuvoje kontroliuojamos tik CO emisijos, jos neturi viršyti 3,5% [21]. Varikliui naudojant bet kurią iš tirtų degalų tiekimo sistemų, leistina CO norma nebuvo viršyta.

Išvados

1. Degalų sąnaudų tyrimo metu pastebėta, kad:

- varikliui naudojant SND, degalų sąnaudos išaugo nuo 26,5 iki 42,1% priklausomai nuo SND tiekimo sistemos ir lyginant su benzino sąnaudomis. Didžiausios degalų sąnaudos buvo naudojant 1-os kartos SND tiekimo įrangą;
- naudojant universalų benzino tiekimo EVB, didžiausią įtaką įpurškiamam degalų kiekiui turi įsiurbimo kolektoriaus slėgio jutiklio duomenys. Įsiurbimo kolektoriaus slėgis ženkliai keičiasi nuo droselinės sklendės padėties, kuri priklauso nuo vairuotojo veiksmų;
- naudojant 4-os kartos SND įrangą ir papildomai keičiant benzino įpurškimo EVB uždegimo paankstinimo kampą bei uždaro rato degiojo mišinio korekcijos nustatymus, vidutinis slėgis įsiurbimo kolektoriuje buvo 7,8% didesnis, o degalų sąnaudos sumažėjo ~1% nei naudojant 4-os kartos SND įrangą be benzino įpurškimo EVB parametrų pakeitimų. Tai parodo padidėjusį variklio darbo efektyvumą. Tačiau variklio darbas tapo nestabilus ir oro-degalų santykio kreivėje buvo matomi pikai nurodantys mišinio uždegimo pertrūkius;

2. Variklio galios tyrimo metu pastebėta, kad:

- apskaičiuota variklio galia varikliui dirbant su 1-os ir 4-os kartos SND sistemomis buvo atitinkamai 10,5% ir 5,1% mažesnė nei dirbant benzinu. Pakeitus benzino įpurškimo EVB parametrus, variklio galia dirbant su 4-os kartos SND sistema buvo beveik lygi varikliui naudojant benzino įpurškimo sistemą;
- 1-os kartos SND sistema, nesugeba tiekti pakankamo degalų kiekio visame variklio darbo diapazone ir degusis mišinys ima liesėti esant didesniems variklio sūkiams;
- varikliui naudojant benzino ir SND įpurškimo sistemas, reikalingos skirtingos *įpurškimo laiko korekcijos aptikus pagreičio sąlygą* reikšmės. Tai galima paaiškinti tuo, kad korekcija neskirta įvertinti degalų purkštukų atidarymo laiko, kuris tyrimo metu naudotiems dujų purkštukams yra 2,6 karto ilgesnis nei benzino purkštukų atidarymo laikas. Be to, naudotos šios korekcijos reikšmės buvo netinkamos abiem atvejais, nes korekcija neatliko savo funkcijos išlaikyti stabilų oro-degalų santykį.

3. Žalingos išmetamųjų dujų emisijos labiausiai priklauso nuo naudojamos degalų rūšies ir naudojamo oro-degalų mišinio. Naudojant SND, pastebėtos iki 71,2% mažesnės CO ir iki 43,7% mažesnės CH emisijos, o NO_x ir CO₂ emisijos išaugo iki 116,7% ir 57,1% atitinkamai.

Lyginant tarpusavy žalingas emisijas varikliui veikiant su 4-os kartos SND įrangą, kai pakeičiamas uždegimo paankstinimo kampas, CO₂ emisijos sumažėjo, CH emisijos pakilo bei pastebėtas aukštesnis įsiurbimo kolektoriaus slėgis, žemesnės variklio apsukos ir didesnis oro-degalų ekvivalentiškumo santykis. Iš to galima daryti prielaidą, kad degimo procesas buvo nestabilus.

Literatūros sąrašas

1. U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). International energy outlook 2016. Washington, DC, May, 2016 [žiūrėta 2020.02.23]. Prieiga per: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf)
2. ORGANIZATION OF THE PETROLEUM EXPORTING COUNTRIES (OPEC). 2013 World oil outlook. Vienna, Austria, 2013 [žiūrėta 2020.02.23]. Prieiga per: https://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/WOO_2013.pdf
3. ROSO, V. R., et al. Effects of mixture enleanment in combustion and emission parameters using a flex-fuel engine with ethanol and gasoline. Applied Thermal Engineering [interaktyvus]. March, 2019, Vol. 153, 463-472 [žiūrėta 2020.02.23]. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.012
4. PRADEEP BHASKER, J., PORPATHAM, E. LPG gaseous phase electronic port injection on performance, emission and combustion characteristics of Lean Burn SI Engine. Earth and Environmental Science [interaktyvus]. 2016, Vol. 40, 012069 [žiūrėta 2020.02.23]. doi: 10.1088/1755-1315/40/1/012069
5. ERKUŞ, B., SÜRMEŃ, A., İHSAN KARAMANGİL, M. A comparative study of carburation and injection fuel supply methods in an LPG-fuelled SI engine. Fuel [interaktyvus]. May, 2013, Vol. 107, 511-517 [žiūrėta 2020.02.23]. doi: 10.1016/j.fuel.2012.12.061
6. CEVİZ, M. A., YÜKSEL, F. Cyclic variations on LPG and gasoline-fuelled lean burn SI engine. Renewable Energy [interaktyvus]. October, 2006, Vol. 31, Iss. 12, 1950-1960 [žiūrėta 2020.02.23]. doi: 10.1016/j.renene.2005.09.016
7. NGUYEN DUC, K., NGUYEN DUY, V. Study on performance enhancement and emission reduction of used fuel-injected motorcycles using bi-fuel gasoline-LPG. Energy for Sustainable Development [interaktyvus]. April, 2018, Vol. 43, 60-67 [žiūrėta 2020.02.23]. doi: 10.1016/j.esd.2017.12.005
8. BAYRAKTAR, H., DURGUN, O. Investigating the effects of LPG on spark ignition engine combustion and performance. Energy conservation and management [interaktyvus]. August, 2005, Vol. 46, Iss. 13-14, 2317-2333 [žiūrėta 2020.02.23]. doi: 10.1016/j.enconman.2004.09.012
9. SULAIMAN, M. Y., AYOB, M. R., MERAN, I. Performance of Single Cylinder Spark Ignition Engine Fueled by LPG. Procedia Engineering [interaktyvus]. 2013, Vol. 53, 579-585 [žiūrėta 2020.02.23]. doi: 10.1016/j.proeng.2013.02.074
10. MOCKUS, S., et al. Analysis of exhaust gas composition of internal combustion engines using liquefied petroleum gas. Journal of environmental engineering and landscape management [interaktyvus]. March, 2006, Vol. 14, No 1, 16-22 [žiūrėta 2022.04.20]. doi: 10.3846/16486897.2006.9636874
11. RASLAVIČIUS, R., et al. Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport. Renewable and Sustainable Energy Reviews [interaktyvus]. April, 2014, Vol. 32, 513-525 [žiūrėta 2022.04.20]. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.052
12. SIM, H., et al. A study on the injection characteristics of a liquid-phase liquefied petroleum gas injector for air-fuel ratio control. Journal of Automobile Engineering [interaktyvus]. August, 2005, Vol. 219, Iss. 8, 1037-1046 [žiūrėta 2020.02.23]. doi: 10.1243/095440705X34621
13. LPG PROPANE/BUTANE MIXTURES [žiūrėta 2020.02.23]. Prieiga per: <https://www.mylpg.eu/useful/lpg-mixture/>

14. LOGANATHAN, M., RAMESH, A. Study on manifold injection of LPG in two stroke SI engine. Journal of the Energy Institute [interaktyvus]. September, 2007, Vol. 80(3), 168-174 [žiūrėta 2020.02.23]. doi: 10.1179/174602207X216255
15. LAMINAR FLAME SPEEDS [žiūrėta 2020.02.23]. Prieiga per: <http://ignis.usc.edu/Mechanisms/USC-Mech%20II/laminar%20flame%20speed.htm>
16. LPG STANDARDS ANT TYPICAL PROPERTIES [žiūrėta 2020.02.23]. Prieiga per: https://www.iea-amf.org/content/fuel_information/lpg#standards
17. LPG/PROPANE/BUTANE SAFETY DATA SHEET ACCORDING TO EC 1907/2006 [žiūrėta 2020.02.23]. Prieiga per: https://www.flogas.ie/assets/uploads/documents_autopopulate/Safety_And_Instruction_Guides/Safety_Data_Sheet_33257.pdf
18. DEGALŲ KAINŲ STATISTIKA [žiūrėta 2020.02.23]. Prieiga per: <http://www.degalukainos.lt/degalu-kainu-statistika>
19. SVARSTYKLIŲ TECHNINIAI DUOMENYS [žiūrėta 2022.04.20]. Prieiga per: <https://manualzz.com/doc/en/57448647/steinberg-basic-sbs-pt-50-2-benutzerhandbuch>
20. DUJŲ ANALIZATORIAUS DUOMENYS [žiūrėta 2022.04.20]. Prieiga per: https://www.tecnomotor.it/site/tecnomotor2_webprofessional_it/ebusiness/depliant/Opa-GAS_en.pdf
21. MOTORINIŲ TRANSPORTO PRIEMONIŲ TECHNINIAI REIKALAVIMAI [žiūrėta 2022.04.20]. Prieiga per: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.677E0A63A536/EJvnxvDxEv>