

GAMTINIŲ DUJŲ IR BENZINO NAUDOJIMO KIBIRKŠTINIO UŽDEGIMO VARIKLYJE EFEKTYVUMO TYRIMAS

Jevgenij Kibickij, Vilius Bartulis, Alfredas Rimkus, Mindaugas Melaika
Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Anotacija. Straipsnyje pateikti „Nissan Qashqai HR16DE“ variklio energetinių ir ekologinių rodiklių pokyčio tyrimai, benzina pakeitus suslėgtomis gamtinėmis dujomis (SGD). Suslėgtų gamtinių dujų panaudojimo vidaus degimo variklyje efektyvumas analizuojamas atliekant eksperimentinius tyrimus bei naudojant skaitinę modeliavimo programą „AVL Boost“. Gauti tyrimų rezultatai rodo, kad varikliui veikiant SGD degalais sumažėja jo galia, lyginamosios degalų sąnaudos, išmetamųjų dujų temperatūra, azoto oksidų (NO_x), angliavandenilių (CH), anglies oksidų (CO), anglies dioksido (CO₂) koncentracija deginiuose, bei padidėja variklio naudingumo koeficientas.

Reikšminiai žodžiai: vidaus degimo variklis, suslėgtos gamtinės dujos, variklio galia, teršalų emisija.

Įvadas

Pastaraisiais metais pasaulyje vis dažniau keliama automobilių ekologiškumo problema (Baltoji knyga, 2011). Griežtėjantys aplinkosaugos reikalavimai priverčia automobilių gamintojus ieškoti naujų sprendimų ir būdų, mažinančių išmetamųjų dujų emisiją į aplinką. Pamažu į rinką skverbiasi elektromobiliai, tačiau ribotas nuvažiuojamas atstumas, didelė elektromobilių kaina bei nepakankamai išvystyta infrastruktūra stabdo šių transporto priemonių paklausą. Todėl vidaus degimo varikliu varomi automobiliai vis dar išlieka perkamiausiais naujų ir naudotų automobilių rinkoje.

Vienas išmetamųjų teršalų emisijos mažinimo sprendimas – suslėgtų gamtinių dujų panaudojimas. Sudegus šioms dujoms, į aplinką yra išmetama mažesnė kenksmingų medžiagų emisija. Taip pat šios dujos turi didesnę oktaniškumą nei benzinas ir tai leidžia padidinti suslėgimo pabaigos parametrus (slėgį ir temperatūrą) išvengiant detonacijos. Šiuo atveju didėja variklio galia (Heywood, 1988). Tačiau mokslininkai pastebi, kad naudojant gamtines dujas vietoje benzino būtina ankstinti uždegimo paskubos kampą bent keliais laipsniais. Taip pat nustatyta, kad naudojant gamtines dujas lyginamosios degalų sąnaudos sumažėja (Evans *et al.* 1997). Aslam *et al.* eksperimentiniu būdu nustatė, kad anglies monoksido (CO), anglies dvideginio (CO₂) ir CH teršalų emisija sumažėjo, naudojant gamtinių dujų degalus.

Šio darbo tikslas – išanalizuoti „Nissan Qashqai HR16DE“ vidaus degimo variklio energetinių ir ekologinių rodiklių pokytį, pakeitus benzina į SGD.

Degalų savybės

Gamtinės dujos visame pasaulyje yra pigesnės negu naftos produktai. Naudojant gamtines dujas, išlaidos degalams sumažinamos 20 – 40 % (Tonkonogij, 2012). Todėl tai yra puiki alternatyva benzininiams ir dyzeliniams degalams. Taip pat gamtinių dujų šilumingumas yra ženkliai didesnis, negu kitų degalų rūšių, SGD sudėtyje mažesnis C/H santykis (1 lentelė). Gamtinių dujų telkinių kiekis Žemėje ženkliai viršija naftos atsargas (Tonkonogij, 2012).

1 lentelė

Ivairių degalų savybių šilumingumo palyginimas

Eil. Nr.	Savybės	Degalų sudėties pagrindiniai elementai	Žemutinis šilumingumas H ₂ , MJ/kg
1	Suslėgtos gamtinės dujos (97 % CH ₄)	76 C, 24 H	47,7
2	Benzinas	85 C, 15 H	43,5
3	Dyzelinas	86 C, 14 H	42,5
4	Suskystintos naftos dujos	82 C, 18 H	46,1

Šaltinis: Katinas *et al.*, 2012; Bosch, R. 2000

Tyrimo metodika

Eksperimentiniai bandymai yra atlikti Vilniaus Gedimino technikos universitete, Transporto inžinerijos fakultete, Automobilių transporto katedroje, vidaus degimo variklių laboratorijoje.

Tyrimams atlikti naudojamas automobilio Nissan Qashqai HR16DE benzininis vidaus degimo variklis, kurio techniniai duomenys pateikti 2 lentelėje.

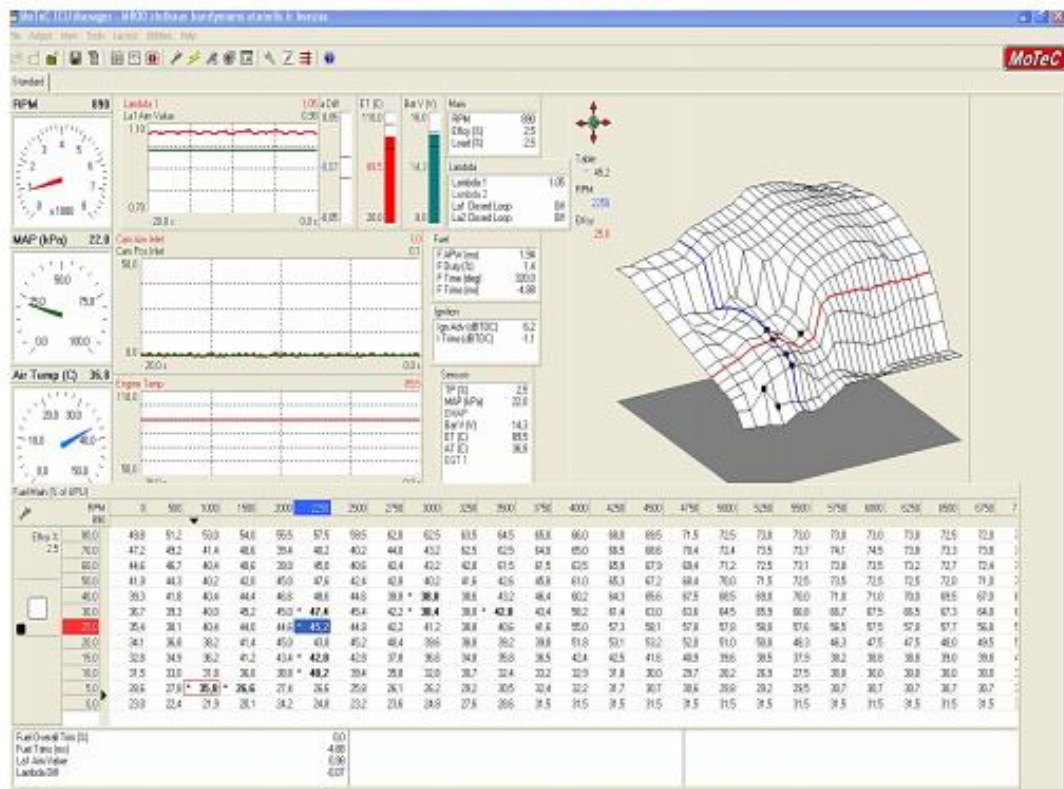
2 lentelė

Variklio HR16DE techniniai duomenys

Parametras	Dydis
Cilindrų skaičius	4
Cilindro skersmuo, mm	78
Stūmoklio eiga, mm	83,6

Parametras	Dydis
Darbinis tūris, cm ³	1598
Nominalioji galia, kW	84
Maksimalus variklio sukimo momentas $M_e \text{ max}$, Nm	156/4400
Suspaudimo laipsnis ϵ	10,7 : 1
Vožtuvų skaičius cilindrai	4
Cilindrų išsidėstymas	cileje
Aušinimo sistema	skystinė

Šaltinis: sudaryta autorių



1 pav. Variklio darbo valdymo žemėlapis

Šaltinis: sudaryta autorių

Tyrimams naudojama suslėgtų gamtinių dujų įranga turi programuojamą valdymo bloką, kuris veikia nepriklausomai nuo vidaus degimo variklio valdymo bloko. Šis pranašumas leidžia skirtingais kiekiais įpurkšti dujas į siurbimo traktą. Įpurškiamų dujų kiekis reguliuojamas purkštukų atidarymo trukme. Atliekant eksperimentą, kiekvieno bandymo metu variklio valdymo blokas *MoTeC M800* yra programuojamas, t. y. atliekama įpurškiamų degalų kiekio korekcija. Benzino purkštuvų išpurškiamo degalų kiekio programos valdymo langas pateiktas 1 pav. Šiame lange matomas degalų kiekio įpurškimo žemėlapis priklausomai nuo droselinės sklendės padėties ir nuo variklio sūkių. Lango viršutinėje kairėje pusėje matomi variklio darbo parametrai: sūkių, slėgis įsiurbimo kolektoriuje, įsiurbiamo oro temperatūra, degiojo mišinio sudėtis. Degiojo mišinio sudėtis, atliekant tyrimą, yra prilyginama stochiometriniam ($\lambda = 1$).

Tyrimai atliekami dviem etapais – pirmiausia variklio energetiniai ir ekologiniai rodikliai yra fiksuojami varikliui dirbant benzinu, o paskui – suslėgtomis gamtinėmis dujomis. Bandymai atliekami varikliui dirbant skirtingais sūkių: 1500 min⁻¹; 2500 min⁻¹. Šie sūkių yra aktualiausi, kadangi tai yra sūkių, kuriais variklis dirba važiuojant miesto režimu. O būtent miestuose ir yra išmetami didžiausi kenksmingųjų dalelių kiekiai.

Gamtinės dujos turi savybę ilgiau degti, lyginant su benzinu. Todėl norint nustatyti geriausius variklio rodiklius reikia parinkti optimaliausią uždegimo paskubos kampą. Atliekant bandymus variklis dirbo prie šių uždegimo paskubos kampų: -36°; -34°; -32°; -30°; -28°; -26°; -24°; -22°; -20°; -18°; -16°; -14°. Prie kiekvieno uždegimo paskubos kampo variklio energetiniai ir ekologiniai rodikliai yra fiksuojami po 10 kartų ir

apskaičiuojami nagrinėjamų parametrų vidurkiai. Toks duomenų fiksavimas vyksta prie kiekvienų anksčiau minėtų sūkių. Variklis bandomas esant 15 % atidarytai droselinei sklendei.

Tiriamą variklio degimo proceso analizę atlikta šį procesą modeliuojant AVL BOOST programa. Į AVL BOOST paprogramę BURN įvedus variklio veikimo parametrus (slėgį cilindre darbo ciklo metu, degalų ir oro sąnaudas) nustatome variklio cilindre vykstančio degimo pradžią φ_0 , trukmę φ_c ir Vibe degimo intensyvumo rodiklį m_v . Šilumos išsiskyrimo intensyvumas ciklo metu nustatomas naudojant Vibe šilumos išsiskyrimo funkciją:

$$\frac{dx}{d\varphi} = 6.908 \frac{m_v + 1}{\varphi_c} \left(\frac{\varphi}{\varphi_c} \right)^{m_v} \exp \left[-6.908 \left(\frac{\varphi}{\varphi_c} \right)^{m_v + 1} \right] dx = \frac{dQ}{Q} \quad (1)$$

čia Q – per darbo ciklą degalų išskirtas šilumos kiekis; φ – alkūninio veleno pasisukimo kampas; m_v – Vibe degimo intensyvumo rodiklis; φ_c – degimo trukmė, išreikšta alkūninio veleno pasisukimo kampu.

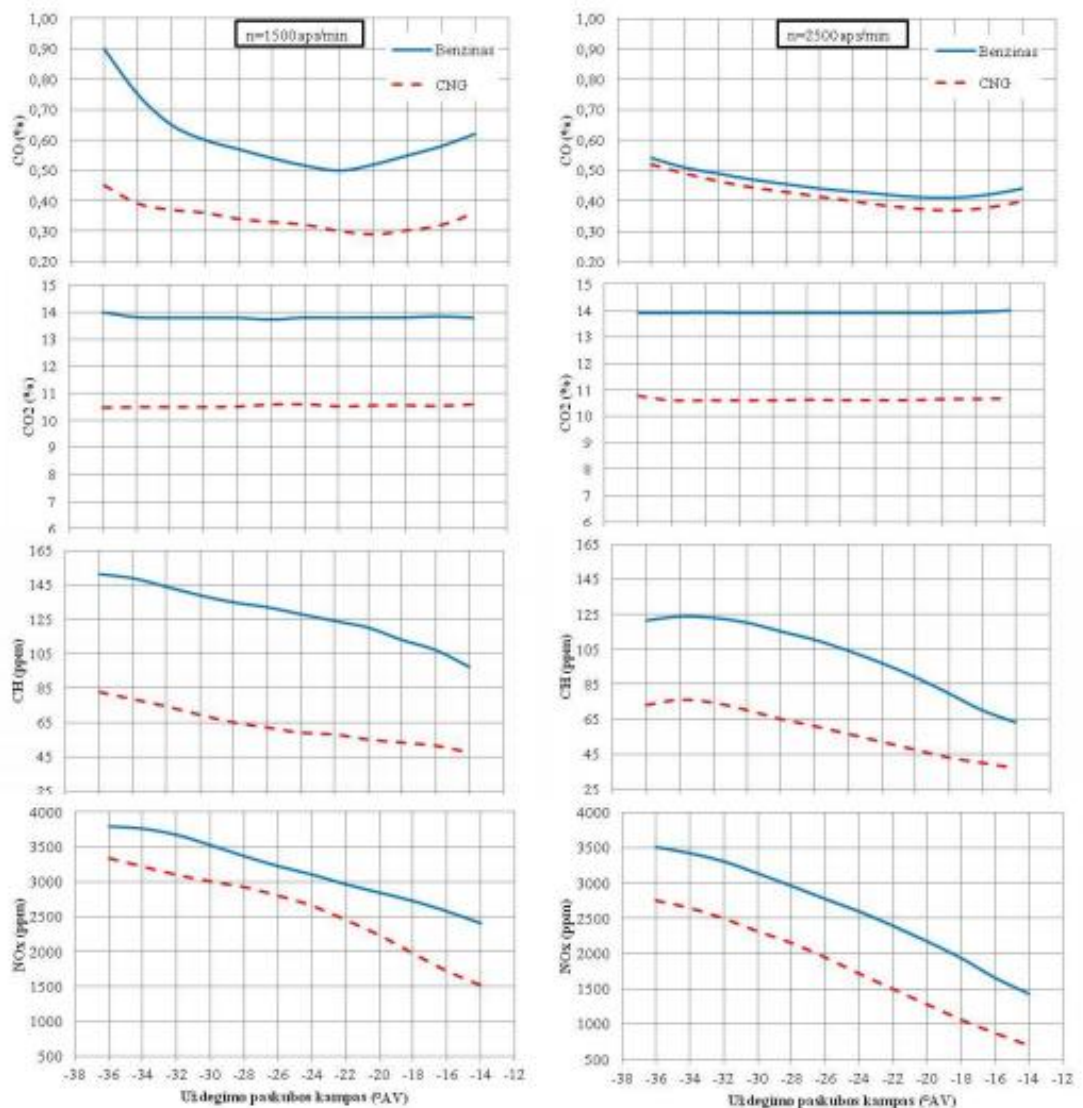
Tyrimų rezultatai ir jų analizė

2 pav. matyti, jog anglies monoksido (CO) emisija nors ir santykinai nedaug (~4 %), tačiau sumažėjo. Mažėjimą lemia trumpesnė suslėgtų gamtinių dujų molekulinė grandinė lyginant su benziniais degalais (įvyksta pilnesnis degimas). Didžiausias skirtumas tarp kreivių pastebimas varikliui dirbant 1500 aps/min sūkiams, o mažiausias – dirbant 2500 aps/min. Iki tam tikros ribos mažinant uždegimo paskubos kampą vyksta CO emisijos mažėjimas, tačiau uždegimo paskubos kampui esant -16°AV ir -14°AV - CO reikšmės vėl pradeda didėti. Nustatyta, jog optimaliausias uždegimo paskubos kampas, prie kurio mažiausia CO emisija yra -18°AV .

Anglies dioksido (CO₂) emisija sumažėjo ženkliai (~24 %). Taip yra dėl mažesnio anglies kiekio suslėgtose gamtinėse dujose (C/H santykio). CO₂ emisijos mažėjimas stebimas nepriklausomai nuo to, koks yra uždegimo paskubos kampas. Skirtumas tarp kreivių nepriklauso nuo to, kokiais sūkiams dirba variklis. Angliavandenilių (CH) emisija taip pat pastebimai (~35 %) sumažėjo. Taip atsitiko dėl trumpesnės degalų angliavandenilių grandinės gamtinėse dujose (lengviau reaguoja ir geriau sudega).

Azoto oksidų (NO_x) emisija sumažėjo (~24%). Taip atsitiko dėl žemesnės dujų degimo temperatūros (dujos turi savybę lėčiau degti). Varikliui dirbant tiek benzinu, tiek suslėgtomis gamtinėmis dujomis, mažiausias kiekis azoto oksidų yra išmetamas esant uždegimo paskubos kampui -14°AV , o didžiausias – esant -36°AV . Didžiausias skirtumas tarp kreivių pastebimas varikliui dirbant 1500 aps/min sūkiams, o mažiausias – dirbant 2500 aps/min. Remiantis anksčiau pateiktais duomenimis galima teigti, jog ekologiškumo atžvilgiu suslėgtos gamtinės dujos yra geresnės už benzininius degalus ir tai yra puiki alternatyva iškastiniams degalams.

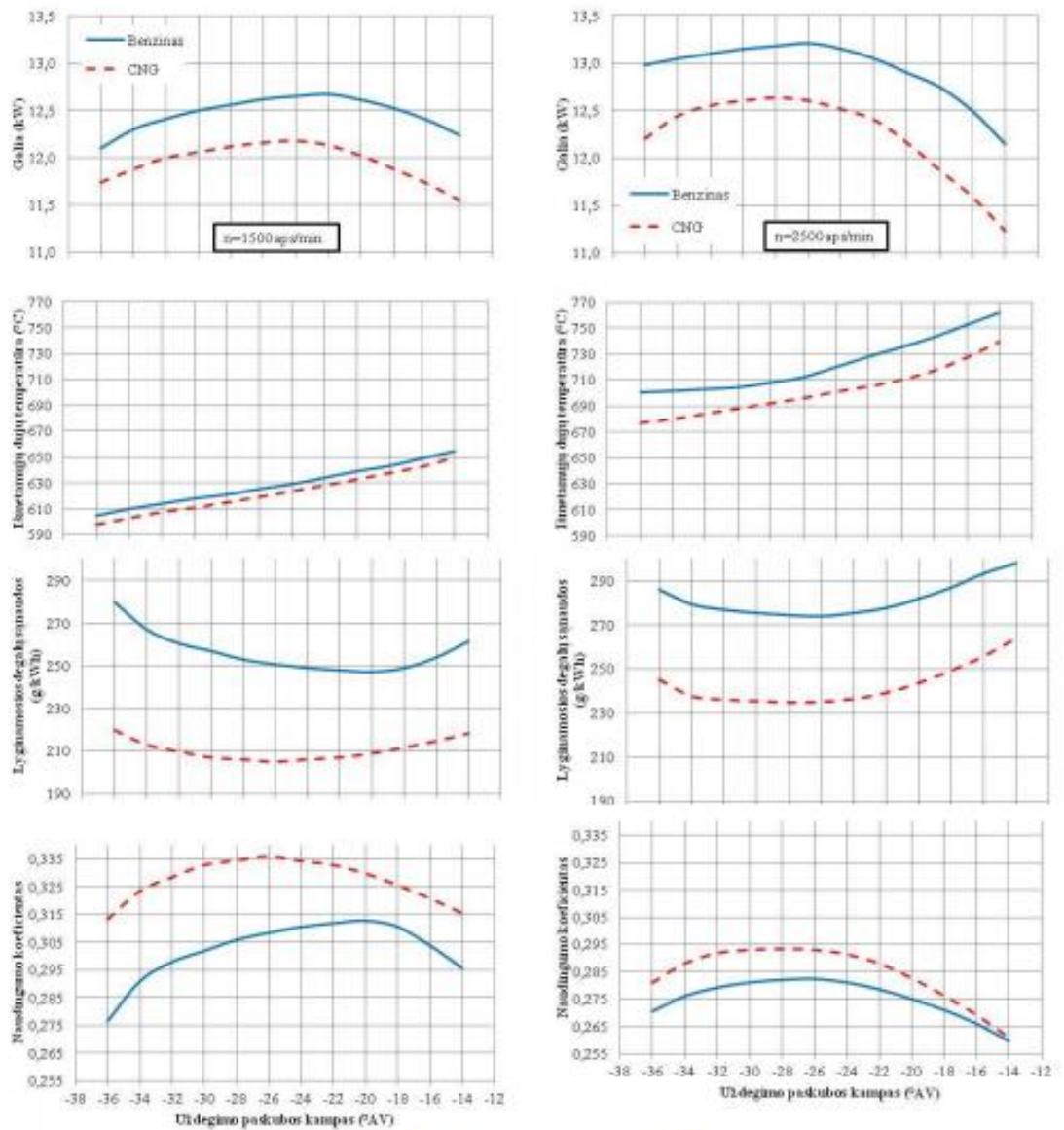
3 pav. matome, jog benzininius degalus pakeitus suslėgtomis gamtinėmis dujomis, variklio galia (~11 %) sumažėjo. Dujas įpurškiant į įsiurbimo kolektorių, jos užima tam tikrą tūrį, todėl sumažėja cilindro pripildymas oru. Kadangi palaikomas stochiometrinis mišinys, automatiškai pablogėja cilindro pripildymas degiuoju mišiniu. Tai pagrindinė priežastis, dėl kurios sumažėjo variklio galia, degimo temperatūra ir atitinkamai išmetamųjų dujų temperatūra. Dėl sumažėjusio degiojo mišinio kiekio sumažėja ir CO, CO₂, CH ir NO_x koncentracija deginiuose. Reikia pastebėti, jog varikliui dirbant skirtingais sūkiams, didžiausia variklio galia pasiekama esant skirtingiems uždegimo paskubos kampams.



2 pav. Išmetamųjų dujų emisijos (CO; CO₂; CH; NO_x) rodikliai

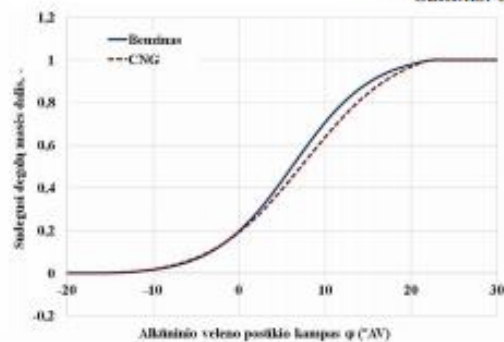
Šaltinis: sudaryta autorių

Varikliui dirbant suslėgtomis gamtinėmis dujomis, lyginamosios degalų sąnaudos (~15 %) sumažėjo. Didžiausias skirtumas tarp kreivių pastebimas varikliui dirbant 1500 aps/min sukiais, o mažiausias – dirbant 2500 aps/min. Benzinaž pakeitus suslėgtomis gamtinėmis dujomis variklio naudingumo koeficientas (~2 %) padidėjo. Tai reiškia, jog dirbdamas suslėgtomis gamtinėmis dujomis, variklis efektyviau panaudoja degimo metu gautą šiluminę energiją naudingam darbui atlikti. To priežastis – trumpesnė dujų molekulinė grandinė, dėl ko degalai geriau sudega. Didėjant variklio sukiam, skirtumas tarp kreivių mažėja.



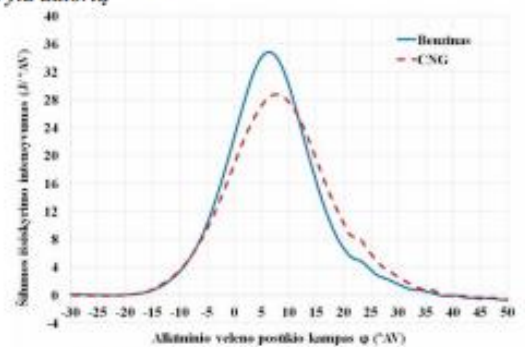
3 pav. Variklio energetiniai rodikliai

Šaltinis: sudaryta autorių



4 pav. Degimo proceso analizė: sudegusių degalų masės dalis

Šaltinis: sudaryta autorių



5 pav. Degimo proceso analizė: šilumos išsiskyrimo intensyvumas

Šaltinis: sudaryta autorių

Degimo proceso analizė, atlikta AVL BOOST programa, parodė, kad suslėgtos gamtinės dujos dega mažesniu greičiu. Tai parodo sudegusių degalų masės dalies pokytis priklausomai nuo veleno pasisukimo kampo (4 pav.) ir nuo to priklausantis šilumos išsiskyrimo intensyvumas (5 pav.). Remiantis degimo proceso analize ir variklio galios pokyčio tendencijomis, galima teigti, kad benzinaž pakeitus suslėgtomis gamtinėmis dujomis, siekiant geriausių variklio energetinių rodiklių, uždegimą reikia ankstinti 2 – 4 °AV.

Išvados

Atlikti suslėgtų gamtinių dujų panaudojimo benzininiame vidaus degimo variklyje eksperimentiniai tyrimai ir degimo proceso skaitinis modeliavimas leidžia suformuluoti apibendrintas išvadas:

1. Benzinaž pakeitus suslėgtomis gamtinėmis dujomis sumažėja CO, CO₂, CH ir NO_x koncentracija deginiuose bei išmetamųjų dujų temperatūra. Šį rezultatą lėmė mažesnė anglies koncentracija dujose, paprastesnė dujų molekulinė grandinė. Dujos užima didesnį degimo kameros tūrį nei benzino garai ir tai sumažina cilindro pripildymą degiuoju mišiniu ir daro įtaką deginių emisijai.

2. Varikliui dirbant suslėgtomis gamtinėmis dujomis, lyginamosios degalų sąnaudos sumažėjo ~15 % ir ~2 % padidėjo variklio naudingumo koeficientas. Šiems rodikliams didžiausią įtaką turi efektyvus gamtinių dujų degimas dėl paprastesnės jų molekulinės grandinės. Tačiau dėl blogesnio cilindro pripildymo variklio galia sumažėjo iki 11 %.

3. Variklio energetinius rodiklius, naudojant gamtines dujas, galima pagerinti uždegimą paankstinus 2 – 4 °AV, nes dujų – oro mišinys dega lėčiau už benzino degųjį mišinį.

4. Įvertinus eksperimentiniu ir skaitinio modeliavimo būdu ištirtą kibirkštinio uždegimo variklio energetinius ir ekologinius rodiklius galima daryti išvadą jog variklio modifikavimas benzinaž pakeičiant SGD yra tikslingas.

Literatūra

1. Aslam, M.U., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Abdesselam, H., Mahlia, T.M.L., Amalina, M.A. An experimental investigation of CNG as an alternative fuel for a retrofitted gasoline vehicle. *Fuel* 85 (2006) 717-724.
2. *Apie suslėgtas gamtines dujas*. 2011 [interaktyvus] [žiūrėtas 2017 m. kovo 16 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.sgdujos.lt/suslegtos-gamtines-dujos-ekologiskas-kuras-automobiliams/>>.
3. „AVL Boost“. 2011. *Users Guide*.
4. Bosh, R. 2009. *Benzininių variklių valdymo sistemos*. Kaunas: „Smaltijos“ leidykla. 128 p.
5. Europos Komisija. Baltoji knyga. 2011. *Bendros Europos transporto erdvės kūrimo planas. Konkurencingos efektyviu išteklių naudojimu grindžiamos transporto sistemos kūrimas*. Briuselis.
6. Evans, R.L., Blaszczyk, J. 1997. A comparative study of the performance and exhaust emissions of a spark ignition engine fuelled by natural gas and gasoline. *Proc Instn Mech Engrs* 211 Part D (1997) 39-47.
7. Heywood, J. B. 1988. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw Hill Series. ISBN 0-07-028637-X.
8. Katinas, V., Savickas, J. 2012. *Dujinių degalų vartojimo transporto plėtros analizė*. Kaunas: Lietuvos energetikos institutas. 151 p.
9. Sendzikiene, E., Rimkus A., Melaika M., Makareviciene V., Pukalskas S. 2015. Impact of biomethane gas on energy and emission characteristics of a spark ignition engine fuelled with a stoichiometric mixture at various ignition advance angles. *Fuel* 162 (2015) 194–201.
10. Tonkonogij, J. 2012. *Gamtinių dujų parametų pokyčio analizė ir tinkamų vartotojams verčių nustatymas AB „Lietuvos dujos“ perdavimo sistemoje. Galutinė ataskaita*. Kaunas: Lietuvos energetikos institutas. 16 p.
11. Bosch, R. 2000. *Автомобильный справочник*. Москва: Зарулем, 895 p.

RESEARCH OF NATURAL GAS AND GASOLINE USE EFFICIENCY IN SPARK-IGNITION ENGINE

Summary

This paper presents the Nissan Qashqai HR16DE engine efficient and ecological indices when replacing gasoline fuel with compressed natural gas (CNG). The effectiveness of compressed natural gas use in the internal combustion engine was analyzed during the experimental studies and using a numerical simulation software AVL Boost. The obtained results indicate that the engine running on CNG fuel achieve lower power, brake specific fuel consumption, exhaust gas temperature, nitrous oxides (NO_x), hydrocarbons (HC), carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂) concentration in the exhaust gases and has an increased engine efficiency.

Key words: internal combustion engine, compressed natural gas, engine power, exhaust gas emissions.

Padėka. Straipsnyje atlikti tyrimo rezultatai gauti naudojant *AVL BOOST* vidaus degimo variklių modeliavimo programą, įsigyta pasirašius bendradarbiavimo sutartį tarp *AVL Advanced Simulation Technologies* ir VGTU Transporto inžinerijos fakulteto.

AUTORIŲ LYDRAŠTIS

Autoriaus vardas, pavardė: Jevgenij Kibickij.
Mokslų laipsnis ir vardas: studentas, magistrantas.
Darbo vieta ir pozicija: UAB „Faktoauto“, kėbulų remonto vadybininkas.
Autoriaus mokslinių interesų sritys: vidaus degimo varikliai, transporto ekologija, alternatyvioji energetika.
Telefonas ir el. pašto adresas: +370 62512973, zennkaz4@gmail.com

Autoriaus vardas, pavardė: Vilius Bartulis.
Mokslų laipsnis ir vardas: daktaras, docentas.
Darbo vieta ir pozicija: VšĮ VGTU, Transporto technologinių įrenginių katedros docentas.
Autoriaus mokslinių interesų sritys: kasybos mašinos ir procesai, mašinų sauga.
Telefonas ir el. pašto adresas: vilius.bartulis@vgtu.lt

Autoriaus vardas, pavardė: Alfredas Rimkus.
Mokslų laipsnis ir vardas: daktaras, docentas.
Darbo vieta ir pozicija: VšĮ VGTU, Automobilių transporto katedros docentas.
Autoriaus mokslinių interesų sritys: vidaus degimo varikliai, transporto ekologija, alternatyvioji energetika.
Telefonas ir el. pašto adresas: +370 61571161, alfredas.rimkus@vgtu.lt

Autoriaus vardas, pavardė: Mindaugas Melaika.
Mokslų laipsnis ir vardas: daktaras, lektorius.
Darbo vieta ir pozicija: VšĮ VGTU, Automobilių transporto katedros lektorius.
Autoriaus mokslinių interesų sritys: vidaus degimo varikliai, transporto ekologija, alternatyvioji energetika.
Telefonas ir el. pašto adresas: mindaugas.melaika@vgtu.lt

A COVER LETTER OF AUTHORS

Author name, surname: Jevgenij Kibickij.
Science degree and name: student, postgraduate.
Workplace and position: UAB „Faktoauto“, body repair manager.
Author's research interests: Internal combustion engines, transport ecology, alternative energy.
Telephone and e-mail address: +370 62512973, zennkaz4@gmail.com

Author name, surname: Alfredas Rimkus.
Science degree and name: associated professor.
Workplace and position: VGTU, Automobile Transport department associated professor.
Author's research interests: Internal combustion engines, transport ecology, alternative energy.
Telephone and e-mail address: +370 61571161, alfredas.rimkus@vgtu.lt

Author name, surname: Vilius Bartulis.
Science degree and name: associated professor.
Workplace and position: VGTU, Department of Transport Technological Equipment associated professor.
Author's research interests: mining machinery and processes, machinery safety.
Telephone and e-mail address: vilius.bartulis@vgtu.lt

Author name, surname: Mindaugas Melaika.
Science degree and name: science doctor.
Workplace and position: VGTU, Automobile Transport department, lecturer.
Author's research interests: Internal combustion engines, transport ecology, alternative energy.
Telephone and e-mail address: mindaugas.melaika@vgtu.lt