

DEGALŲ SLĖGIO PULSACIJŲ ĮTAKA CR SISTEMOS ĮPURŠKIMO CHARAKTERISTIKOMS

Denas NŪTAUTAS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas,
el. paštas: denas.nutautas@stud.vdu.lt

Santrauka

Degalų įpurškimas sukelia didelius degalų slėgio svyravimus vamzdelyje prieš purkštuvą. Jeigu yra atliekami keli įpurškimai, ankstesnis įpurškimas turi įtakos toliau einantiems įpurškimams. Slėgio svyravimo amplitudei įtaką daro degalų slėgis, pirmojo įpurškimo porcijos dydis ir degalų savybės. Tyrimo tikslas – ištirti pirmojo (pagalbinio) įpurškimo sukeltų slėgio svyravimų įtaką pagrindinės degalų porcijos dydžiui. Tyrimais buvo nustatyta, kad įpurškiant mineralinį dyzeliną slėgio svyravimo amplitudė siekia 6, 11 ir 18 MPa, esant atitinkamai 60, 120 ir 180 MPa įpurškimo slėgiams ir 0,3 ms pagalbinio įpurškimo trukmei. Pagalbinio įpurškimo trukmę padidinus iki 0,5 ms, slėgio svyravimų amplitudės keitėsi nežymiai ir siekė atitinkamai iki 6, 10 ir 18 MPa. Siekiant ištirti slėgio pulsacijų įtaką cikliniam degalų kiekiui, buvo keičiamas laikas tarp pagalbinio ir pagrindinio įpurškimų taip, kad vienu atveju pagrindinis įpurškimas prasidėtų dėl pagalbinio įpurškimo sukeltų slėgio svyravimų slėgiui didėjant, o kitu atveju – slėgiui mažėjant. Esant 60 MPa slėgiui ir 0,3 ms įpurškimo trukmei, ciklinis degalų kiekis gautas didesnis, kuomet pagrindinis įpurškimas vyksta slėgiui didėjant. Skirtumas siekia 0,22 mg. Tuo tarpu prie 0,5 ms pagalbinio įpurškimo trukmės, ciklinis degalų kiekis buvo 1,28 mg didesnis slėgiui mažėjant. Kai slėgis siekė 120 MPa, ciklinis degalų kiekis prie 0,3 ms gautas didesnis slėgiui didėjant – 0,54 mg, o prie 0,5 ms, mažėjant – 1,59 mg. Prie 180 MPa slėgio abi reikšmės gautos didesnės slėgiui mažėjant – 0,73 ir 0,85 mg.

Reikšminiai žodžiai: slėgis, amplitudė, pulsacija, ciklinis.

Įvadas

Kuriant perspektyvias ir pažangias degalų tiekimo sistemos versijas, svarbu išsiaiškinti jų sukeliamus reiškinius ir slėgio svyravimus. Facta universiteto mokslininkai įrodė, kad esant 150 MPa slėgiui amplitudė yra 35 MPa, o esant 50 MPa amplitudė sumažėjo iki 8 MPa. Didėjant degalų klampumui, didėja jo hidraulinė trintis, todėl greitai slopinami svyravimai. Didėjant slėgiui, didėja svyravimai ir jų įtaka darbo procesui. Dyzeliniams degalams pasiekus 200 MPa slėgį, antros porcijos įpurškimo sklaida yra 2,36–4,62 mg, o esant 300 MPa slėgiui – 1,58–6,63 mg. Šiuolaikiniame pasaulyje ieškoma įvairių būdų sumažinti taršą ir surasti naudingesnę pakaitalą dyzelinui, nepakenkiant įpurškimo sistemai. D. Han ir kt. (2016) atliko tyrimą ir išsiaiškino, kad biodyzelinas gali būti naudojamas kaip alternatyvūs degalai dyzeliniams varikliams, tačiau pasikeitusios degalų savybės turi įtakos įpurškimo charakteristikoms. Gauti tyrimo rezultatai parodė, kad degalų tankis ir suspaudimo modulis turi didesnę įtaką degalų įpurškimo masei ir slėgio svyravimo charakteristikoms purkštovo įleidimo angroje pagrindinio įpurškimo metu. O tuo tarpu degalų klampumo poveikis yra nedidelis. Mokslininkai teigia, kad įpurškimo trukmė tarp bandomojo įpurškimo ir pagrindinio įpurškimo taip pat yra esminis parametras, turintis įtakos įpurškimo charakteristikoms. Šie mokslininkai taip pat tyrė degalų slėgio dinamiką, ciklo įpurškimo greičius ir dviejų pakopų įpurškimo procesų kiekį. Tai parodo, kad fizinės degalų savybės yra svarbios.

Šiame tyrime analizuojama, kaip pagalbinio įpurškimo sukelti slėgio svyravimai veikia pagrindinės degalų porcijos dydį, keičiant įpurškimo slėgį ir laiką tarp įpurškimų. Tyrimo rezultatai leidžia geriau suprasti degalų įpurškimo procesus ir jų įtaką variklio darbui, o gautos išvados gali būti pritaikytos siekiant optimizuoti degalų įpurškimo strategijas vidaus degimo varikliuose.

Tyrimo tikslas – ištirti pirmojo (pagalbinio) įpurškimo sukeltų slėgio svyravimų įtaką pagrindinės degalų porcijos dydžiui.

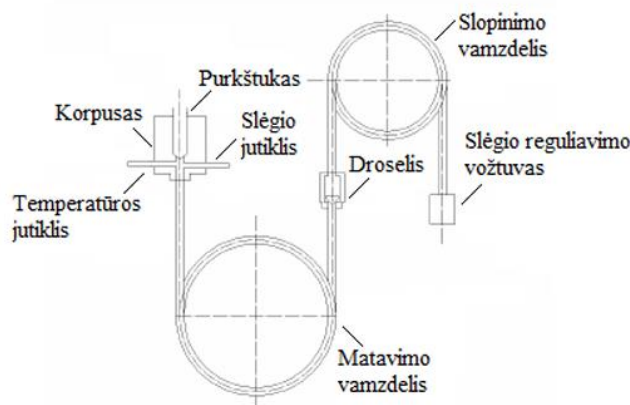
Iškeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Įvertinti slėgio svyravimo amplitudes prie skirtingos pagalbinio įpurškimo trukmės.
2. Įvertinti ciklinių degalų kiekį, kai pagrindinis įpurškimas prasideda slėgiui didėjant ir slėgiui mažėjant.

Tyrimų objektas ir metodai

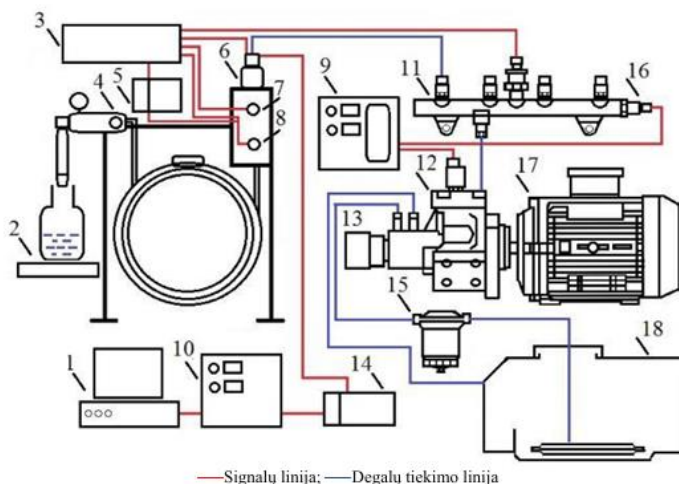
Įpurškimų charakteristikos buvo nustatinėjamos Bosh metodu. Šio metodo esmė – įpurškimo metu registruojama slėgio banga. Tyrimų metu naudoto indikatorius schema nustatyti įpurškimo charakteristikas pateikta 1 pav.

Korpuse tvirtinamas bandomasis purkštukas, jame sumontuoti degalų temperatūros ir slėgio jutikliai. Korpusas sujungtas su ilgu matavimo vamzdeliu, kuris užpildytas degalais. Įpurškimo momentu iš purkštuko išpurškiamas kintantis degalų kiekis, sukuria slėgio bangą, kurią matuoja slėgio jutiklis. Matavimo vamzdelio gale prijungtas droselis, kuris jungia jį su papildomu vamzdeliu ir slopina sklindančią bangą. Matavimo vamzdelis turi būti tokio ilgio, kad nuo droselio atsispindėjusi slėgio banga neiškraipytų matuojamo signalo. Papildomas vamzdelis taip slopina sklindančią slėgio bangą. Slopinimo vamzdelio gale taip pat sumontuotas droselis, kuriuo naudojantis galima imituoti priešslėgį degimo kameroje



1 pav. Tyrimams naudoto Bosh metodo indikatorius principinė schema
Fig. 1 Principle scheme of the Bosch method indicator used for research

Tyrimams naudotą stendą (žr. 2 pav.) sudaro dvi dalys: įpurškimo charakteristikos indikatorius ir „Common-Rail“ sistema. Degalų įpurškimo sistemą sudaro standartinė „Common-Rail“ degalų tiekimo sistema, kurią sudaro didelio slėgio degalų siurblys CP3, degalų akumuliatorius, elektromagnetinis purkštuvas, didelio slėgio degalų tiekimo vamzdeliai, slėgio reguliavimo vožtuvai. Elektros variklis suko CP3 siurblių vietoj VDV.



1 – PC (personalinis kompiuteris); 2 – elektroninės svarstyklės; 3 – gautų duomenų registravimo modulis „AVL Indi Modul“; 4 – degalų slėgio jutiklis; 5 – stiprintuvas „Kistler 5247“; 6 – elektromagnetinis purkštuvas; 7 – degalų temperatūros jutiklis; 8 – degalų prie purkštuko slėgio jutiklis; 9 – CR įpurškimo sistemos slėgio valdymo blokas; 10 – elektromagnetinio purkštovo valdymo sistema „NI PXIe“; 11 – railas (degalų akumuliatorius); 12 – didelio slėgio degalų siurblys „CP3“; 13 – degalų slėgio reguliatorius; 14 – „NI 9161 su NI 9751“ modulis; 15 – degalų filtras; 16 – akumuluojamų degalų slėgio jutiklis; 17 – elektros variklis; 18 – degalų bakas.

2 pav. Degalų įpurškimo charakteristikos tyrimo stendo schema:
Fig. 2 Test bench diagram for fuel injection characteristics analysis:

Indikatoriaus (įpurškimo charakteristikoms) matavimo vamzdelio ilgis buvo lygus 6 m, vidutinis jo skersmuo ~4 mm. Degalų slėgis vamzdyje įpurškimo metu buvo registruojamas pjezoelektriniu „Kistler 6052C“ tipo slėgio jutikliu. Jo matavimo riba 0–25 MPa, matavimo tikslumas $\pm 0,01$ MPa. Jutiklio siunčiamas signalas sustiprinamas „Kistler 5064“ stiprintuvu, signalų duomenys buvo apdoroti „Compact 2854A“ platformoje. Į vamzdelį purškiamų degalų 26 temperatūrą fiksavo Pt100 tipo termojutiklis. Bandymų metu degalų temperatūra buvo palaikoma ~30 °C. Priešslėgis slopinimo vamzdyje buvo matuojamas „Trafag NAT825“ slėgio jutikliu (matavimo riba 0–25 MPa, tikslumas $\pm 0,01$ MPa). Buvo matuojamas slėgio kitimas didelio slėgio vamzdyje (raile) prie degalų akumuliatoriaus bei purkštovo. Slėgiai buvo fiksuojami „Kistler“ įmonės pjezovaržiniais 4067A2000 slėgio jutikliais, kurių matavimo riba 0–200 MPa, tikslumas $\pm 0,1$ proc. Slėgių jutiklių signalai sustiprinti „Kistler 4665“ stiprintuvu, signalai apdoroti „Compact 2854A“ platformoje.

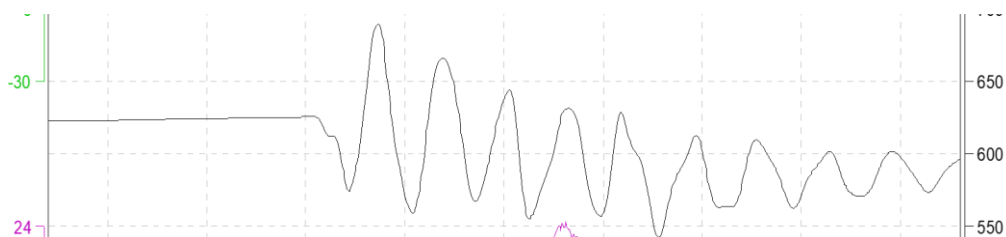
Gauti matuojami duomenys buvo sustiprinti ir siunčiami į „AVL IndiModul 622“ duomenų registravimo sistemą. Buvo fiksuojamos ir analizuojamos apibendrintos 100 ciklinių įpurškimų diagramos.

Analizuojant gautus duomenis buvo nustatinėjami įpurškimų procesų rodikliai: įpurškimų charakteristikos (diferencialinės ir integralinės), cikliniai įpurškų degalų kiekiai, įpurškimų gaisties periodai, degalų įpurškimo trukmės, įpurškiamų degalų slėgio kitimas didelio slėgio vamzdyje, slėgio bangos sklaidimo greitis. Gautų duomenų analizė atlikta naudojant „AVL IndiCom Mobile“ programinę įrangą.

Eksperimentiniai tyrimai atlikti su mineraliniu dyzelinu. Degalai tyrimo metu buvo įpurškiami 60 MPa, 120 MPa ir 180 MPa slėgiu, esant 4 MPa priešslėgiui matavimo kameroje.

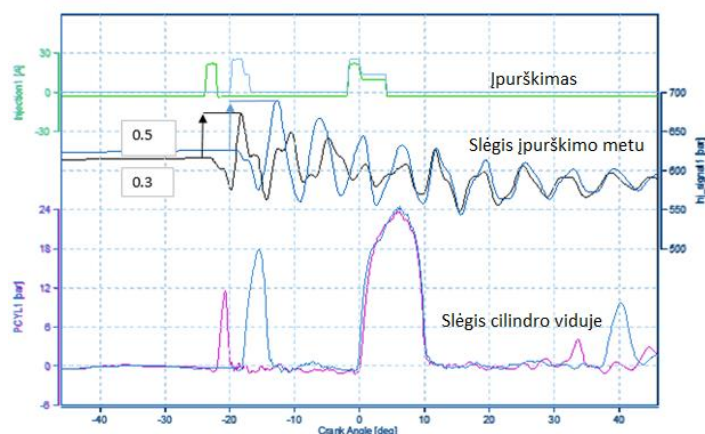
Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Analizuojant gautus duomenis, svarbu suvokti slėgio kitimo reikšmes ir kas vyksta visos kreivės metu. Kairėje pusėje matomas stabilus slėgis (žr. 3 pav.), kol dar nevyksta įpurškimas. Tai reiškia, kad aukšto slėgio siurblys palaiko slėgį degalų magistralėje. Atsidarius purkštukui, slėgis krenta ir degalai pradeda tekėti į cilindrą. Staigus slėgio kritimas atsiranda dėl staigaus degalų nutekėjimo iš magistralės į degimo kamerą. Toliau eina didelės slėgio bangos. Pirmoji didžiausia banga atspindinti mechaninį atsaką į staigų slėgio pokytį. Tolimesni svyravimai – tai slėgio rezonansas degalų magistralėje. Šiuos svyravimus lemia degalų suspaudžiamumas, metalinės degalų vamzdelio savybės ir slėgio reguliavimo vožtuvai. Po kelių ciklų bangos mažėja, nes degalų sistema su slėgio regulatoriumi amortizuoja svyravimus. Magistralės slėgis stabilizuojasi, ruošiamas kitam įpurškimui.

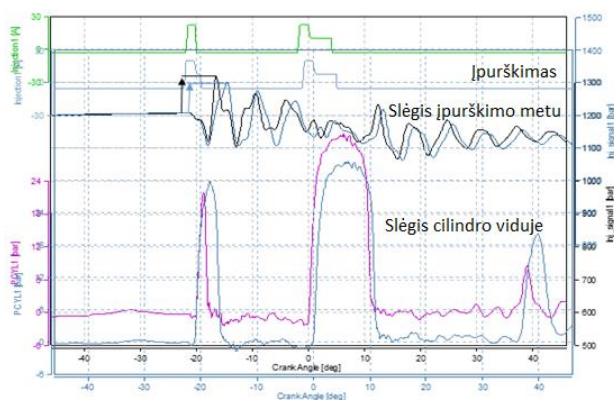


3 pav. Slėgio pulsacijos įpurškimo metu
Fig. 3 Pressure pulsations during injection

Prie 60 MPa įpurškimo slėgio matomi skirtingi slėgio svyravimai. Kaip pateikta 4 pav. ir 5 pav., slėgio svyravimai skiriasi, tačiau slėgio amplitudės išlieka vienodo dydžio. Abejais atvejais slėgio svyravimo amplitudė siekia 6 MPa. Esant didesnei pagalbinio įpurškimo trukmei 0,5 ms, grafikas turi didesnius virpesius ir svyravimus, lyginant su 0,3 ms pagalbinio įpurškimo trukme.

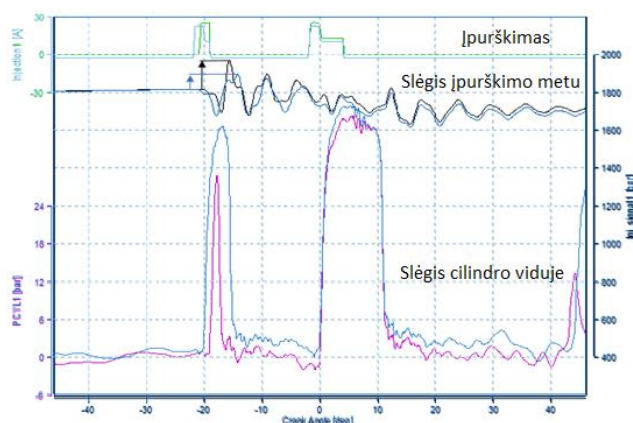


4 pav. Slėgio svyravimo amplitudė esant 60 MPa įpurškimo slėgiui
Fig. 4 Pressure oscillation amplitude at an injection pressure of 60 MPa



5 pav. Slėgio svyravimo amplitudė esant 120 MPa įpurškimo slėgiui
Fig. 5 Pressure oscillation amplitude at an injection pressure of 120 MPa

5 paveiksle pavaizduotos reikšmės, gautos esant 120 MPa įpurškimo slėgiui. Įpurškiant mineralinį dyzeliną prie 0,3 ms ir 0,5 ms pagalbinio įpurškimo trukmės, gautos atitinkamos 11 ir 10 MPa amplitudės. Tai rodo, kad didėjant įpurškimo slėgiams ir keičiant pagalbinį įpurškimą, slėgio svyravimas išlieka panašus, be ženklių amplitudės nuokrypių.



6 pav. Slėgio svyravimo amplitudė esant 180 MPa įpurškimo slėgiui
Fig. 6 Pressure oscillation amplitude at an injection pressure of 180 MPa

Skirtingi rezultatai gauti prie 180 MPa įpurškimo slėgio. Remiantis 6 grafiko duomenimis, galima pastebėti, kad virpesiai purkštuko atidarymo pradžioje skiriasi, tačiau eigoje kreivės tampa panašios. Esant 0,3 ms pagalbinio įpurškimui, slėgio svyravimo amplitudė pasiekė 18 MPa. Tuo tarpu prie 0,5 ms pagalbinio įpurškimo amplitudė turėjo skirtingas reikšmes ir pasiekė 11 MPa.

1 lentelė Cikliniai degalų kiekiai

Table 1. Cyclic fuel quantities

Slėgis (bar) Pressure (bar)	0,3 pagalbinis (didėjant) [mg] 0,3 pilot (increasing) [mg]	0,3 pagalbinis (mažėjant) [mg] 0,3 pilot (decreasing) [mg]	0,5 pagalbinis (didėjant) [mg] 0,5 pilot (increasing) [mg]	0,5 pagalbinis (mažėjant) [mg] 0,5 pilot (decreasing) [mg]
600 bar	25.35	25.13	29.66	30.94
1200 bar	45.38	44.84	53.81	55.40
1800 bar	58.86	59.59	73.03	73.88

Norint ištirti, kaip slėgio pulsacijos veikia ciklinį degalų kiekį, buvo keičiamas laiko tarpas tarp pagalbinio ir pagrindinio įpurškimo – vienu atveju įpurškimas vyko didėjančio slėgio metu, kitu atveju – mažėjančio slėgio fazėje. Gauti duomenys pateikti 1 lentelėje. Esant 60 MPa slėgiui ir 0,3 ms pagalbinio įpurškimo trukmei, ciklinių degalų kiekiai skyrėsi. Didesnė reikšmė gauta slėgiui didėjant, kuri siekė 0,22 mg didesniu kiekiu. Tuo tarpu prie 0,5 ms pagalbinio įpurškimo trukmės, ciklinis degalų kiekis buvo 1,28 mg didesnis slėgiui mažėjant. Kai slėgis siekė 120 MPa, ciklinis degalų kiekis prie 0,3 ms pagalbinio įpurškimo trukmės gautas didesnis slėgiui didėjant – 0,54 mg. Tačiau padidinus pagalbinį įpurškimą iki 0,5 ms, reikšmė gauta didesnė slėgiui mažėjant – 1,59 mg. Prie 180 MPa slėgio abi reikšmės gautos didesnės slėgiui mažėjant – 0,73 ir 0,85 mg.

Mažesniuose slėgiuose (60 MPa, 120 MPa) slėgio pulsacijos daro didesnę įtaką degalų kiekio pokyčiams. Ilgesnis pagalbinis įpurškimas (0,5 ms) labiau iškreipia slėgio dinamiką ir turi didesnę poveikį cikliniam degalų kiekiui.

Išvados

Atlikus tyrimą nustatyta, kad pagalbinio įpurškimo sukeltos slėgio pulsacijos turi reikšmingą įtaką pagrindinės degalų porcijos dydžiui. Slėgio pulsacijų įtaka priklauso nuo įpurškimo slėgio, pagalbinio įpurškimo trukmės ir momento, kuriuo atliekamas pagrindinis įpurškimas (slėgiui didėjant ar mažėjant). Esant mažesniems įpurškimo slėgiams (60 MPa ir 120 MPa), pagrindinės degalų porcijos ciklinis kiekis labiau priklauso nuo slėgio svyravimo krypties. Prie 60 MPa slėgio, kai pagalbinio įpurškimo trukmė siekia 0,3 ms, pagrindinis įpurškimas, atliktas slėgiui didėjant, užtikrina 0,22 mg didesnį ciklinį degalų kiekį. Tuo tarpu prie 0,5 ms pagalbinio įpurškimo trukmės, didesnis ciklinis degalų kiekis (+1,28 mg) gautas slėgiui mažėjant. Prie 120 MPa įpurškimo slėgio ciklinių degalų kiekių skirtumai tarp slėgio didėjimo ir mažėjimo fazių išliko reikšmingi. Esant 0,3 ms pagalbinio įpurškimo trukmei, didesnis ciklinis kiekis (0,54 mg) nustatytas slėgiui didėjant. Padidinus trukmę iki 0,5 ms, didesnis kiekis (1,59 mg) gautas slėgiui mažėjant. Esant 180 MPa slėgiui, abiem atvejais, cikliniai degalų kiekiai buvo didesni, kai pagrindinis įpurškimas vyko slėgiui mažėjant. Atitinkami skirtumai sudarė 0,73 mg ir 0,85 mg. Ilgesnė pagalbinio įpurškimo trukmė (0,5 ms) turi didesnę poveikį slėgio pulsacijų dinamikoje, todėl reikšmingiau veikia pagrindinio įpurškimo metu įpurškiamą ciklinį degalų kiekį. Tyrimo rezultatai parodė, kad mažesniuose slėgiuose (60 MPa, 120 MPa) sistema yra jautresnė slėgio pulsacijoms, kurios stipriau veikia įpurškimo procesų parametrus. Gauti rezultatai leidžia detaliau suprasti „Common Rail“ sistemos veikimą esant

skirtingiems įpurškimo režimams, o tai leidžia kurti efektyvesnes degalų tiekimo strategijas, siekiant sumažinti kuro sąnaudas bei pagerinti variklio darbo stabilumą.

Literatūra

1. Han, D., Li, K., Duan, Y., Lin, H., & Huang, Z. (2017). Numerical study on fuel physical effects on the split injection processes on a common rail injection system. *Energy conversion and management*, 134, 47-58.
2. Han, D., Duan, Y., Wang, C., Lin, H., & Huang, Z. (2015). Experimental study on the two stage injection of diesel and gasoline blends on a common rail injection system. *Fuel*, 159, 470-475..
3. Herfatmanesh, M. R., Peng, Z., Ihracska, A., Lin, Y., Lu, L., & Zhang, C. (2016). Characteristics of pressure wave in common rail fuel injection system of high-speed direct injection diesel engines. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(5), 1687814016648246 OpenAI. (2025).
4. Shatrov, M. G., Dunin, A. U., Dushkin, P. V., Yakovenko, A. L., Golubkov, L. N., & Sinyavski, V. V. (2020). Influence of pressure oscillations in common rail injector on fuel injection rate. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 18(4), 579-593.
5. ChatGPT (3.5 versija) [Didysis kalbos modelis]. Prieiga per internetą: <https://chat.openai.com/chat>. Užklausa: „Slėgio ir įpurškimo įtaka?“ (žiūrėta 2025-03-10)

INFLUENCE OF FUEL PRESSURE PULSATION ON INJECTION CHARACTERISTICS OF CR SYSTEM

Abstract

Fuel injection causes high fuel pressure fluctuations in the tube before the sprayer. If several injections made, the previous injection affects the following injection. The amplitude of the pressure fluctuation is influence by fuel pressure, the size of the first injection portion and the properties of fuel. The aim of the study is to investigate the influence of pressure fluctuations caused by the first (auxiliary) injection on the main portion of fuel. Studies have shown that the amplitude of the pressure fluctuation of the mineral diesel is 6; 11 and 18 MPa at 60, 120 and 180 MPa for injection pressure and 0.3 ms auxiliary injection time. Increasing the duration of auxiliary injection to 0.5 ms, the amplitude of pressure fluctuations changed slightly and reached 6; 10 and 18 MPa. In order to investigate the influence of pressure pulsations on the cyclic fuel content, the time between auxiliary and main injection changed so that in one case the main injection begins due to the pressure fluctuations caused by the auxiliary injection and as the pressure decreases. At a pressure of 60 MPa and an injection duration of 0.3 ms, the cyclic fuel quantity was higher when the main injection occurred during pressure increase. The difference reached 0.22 mg. Meanwhile, the duration of the 0.5 ms auxiliary injection, the cyclic fuel was 1.28 mg higher with pressure decreasing. When the pressure reached 120 MPa, the cyclic fuel at a higher pressure of 0.5 mg increased by 0.3 m and at 0.5 ms, with a decrease in 1.59 mg. At 180 MPa pressure, both values were obtained with higher pressure decreasing - 0.73 and 0.85 mg.

Keywords: pressure, amplitude, pulsation, cyclical.