



17-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos  
**TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA**,  
vykusios 2014 m. gegužės 8 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 17th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'  
**TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT**, 8 May 2014, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 17-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»  
**ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК**, 8 мая 2014 г., Вильнюс, Литва

## **PEREINAMŲJŲ REŽIMŲ ĮTAKOS TRANSPORTO PASKIRTIES DYZELIO EKSPLOATACINIAMS PARAMETRAMS VERTINIMAS REMIANTIS REALIOS EKSPLOATACIJOS DUOMENIMIS**

**Paulius Rapalis<sup>1</sup>, Galina Lebedeva<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>JTF Jūreivystės institutas, Klaipėdos Universitetas, H. Manto g. 84,  
<sup>2</sup>GMMF Informatikos katedra, Klaipėdos Universitetas, H. Manto g. 84,  
El. paštas: <sup>1</sup>Paulius.Rapalis@ku.lt; <sup>2</sup>galina@ik.ku.lt

**Santrauka.** Svarbus dyzelinių variklių eksploatacinių ir ekologinių parametru tyrimų aspektas yra dyzelinio variklio darbo pereinamuosiuose režimuose įtakos įvertinimas. Atliekant vidaus degimo variklių pereinamųjų režimų tyrimus dažniausiai naudojama sudėtinga ir brangi tyrimų įranga, turima dažniausiai tik variklių gamintojų infrastruktūroje. Alternatyvi galimybė naudoti variklio vidinės elektroninės registravimo sistemos duomenis. Duomenų apdorojimui naudojamas autorių sukurtas algoritmas „Dinamika“ leidžiantis įvertinti variklio eksploatacinių parametru nuokrypius lyginant su darbu nusistovėjusia apkrova. Atlikus Tyrimus plačios paskirties CAT3512B-HD variklyje eksploatacijos sąlygose. Gauti parametru nuokrypių duomenys naudojami formuojant variklio matematinį modelį AVL BOOST programoje, kuris bus naudojamas tolesniuose pereinamųjų režimų įtakos energetiniams ir ekologiniams parametrams tyrimuose.

**Reikšminiai žodžiai:** Dyzelinis variklis, pereinamieji režimai, CAT3512B-HD, apkrovos ciklas, eksploataciniai parametrai, AVL BOOST modelis.

### **Įvadas**

Tiriant eksploatuojamų dyzelinių variklių darbo procesus dėmesys dažniausiai skiriamas variklio darbui nusistovėjusiuose režimuose. Tačiau tikrosios variklių darbo sąlygos transporto paskirties dyzeliuose (ypač kelių ir geležinkelių transporte) dažnai būna nepastovios – stabdant, greitinant kinta apkrova ir variklis dirba nenusistovėjusiais (pereinamaisiais) apkrovos režimais. Nenusistovėjusių režimų metu susidaro oro – kuro kiekių disbalansas, žymiai didėja oro teršalų, triukšmo emisijos, neužtikrinama reikalinga galia. Variklio darbo reguliavimas vykstant pereinamiesiems režimams skiriasi priklausomai nuo jo paskirties, pavyzdžiui automobilineis dyzeliams siekiama staigaus galios didėjimo ir ribotos dūmų emisijos. Lokomotyvuose – sinchronizuoto elektrinės ir dyzelio sistemų darbo, vengiant greičio sumažėjimo ir dūmingumo padidėjimo (Rakopoulos, Giakoumis 2009). Tačiau tos pačios serijos varikliai, su nedidelėmis modifikacijomis, dirba skirtingose paskirtyse (pvz. CAT3512B serijos varikliai montuojami kaip laivų eigos varikliai, lokomotyvuose, stacionarios paskirties dyzeliuose generatoriuose ir kt. (CAT3512B dyzelgeneratorių spec.; CAT3512B marine, CAT3512B-HD

spec.)). Skirtingos eksploatacijos sąlygos padaro dyzelio eksploatacinių ir ekologinių parametru optimizavimo užduoti labai sudėtinga. Tuo pat metu pasauliui siekiant sumažinti oro teršalų emisijas įvedami griežtesni reikalavimai bei sudaromi planai siekiant sumažinti kenksmingų teršalų emisijas iš transporto. (White Paper 2011). Šių planų realizavimas tampa vis sudėtingesne užduotimi variklių gamintojams. Išsamius pereinamųjų apkrovos režimų įtakos tyrimus dyzelio eksploataciniams ir ekologiniams parametrams, dirbant tiek įprastais degalais tiek biodegalais, vykdė C. D. Rakopoulos E. G. Giakoumis, M. Dimaratos ir kt. (Rakopoulos *et al.* 2010; Rakopoulos *et al.* 2011. Giakoumis *et al.* 2013). Dyzelių pereinamųjų režimų įtaką lokomotyvų dyzelinių variklių patikimumo rodikliams nagrinėjo L. P. Lingaitis ir kt. (Lingaitis *et al.* 2014), lokomotyvų dyzelių ekologinius rodiklius, dirbant tuščia apkrova arba startuojant nagrinėjo C. S. Weaver (Weaver 2006).

Pereinamųjų režimų tyrimams dažniausiai naudojami dyzeliniai stendai, tačiau pereinamųjų apkrovos režimų įtakos dyzelinio variklio parametrams tyrimų, stendo sąlygose, technologija yra gana sudėtinga, brangi ir naudojama pagrinde dyzelių gamintojų infrastruktūroje. Ne mažiau kokybiškas sprendimas – variklio elektroninės

registracijos sistemos naudojimas, leidžiantis tirti ne tik pereinamuosius režimus, bet ir charakteringas jų eksploatacijos sąlygas ir, pagal galimybes, optimizuojant eksploatacinius ciklus pagal degalų ekonomijos, patikimumo ir ekologinių parametų sąlygas.

**Tyrimų objektas**

Realaus eksploatacinio ciklo tyrimai atlikti plačios paskirties dyzeliniame variklyje su pripūtimu ir tarpiniu oro aušinimu. Šio modelio varikliai naudojami laivuose, šilumvežiuose ir kt. Dyzelinio variklio charakteristikos pateiktos 1 lentelėje.

Tiriama dyzelinio variklio eksploatacinė charakteristika, kai tarp apskukų ir apkrovos (galios) egzistuoja gana griežta priklausomybė:

$$P_e = f(n).$$

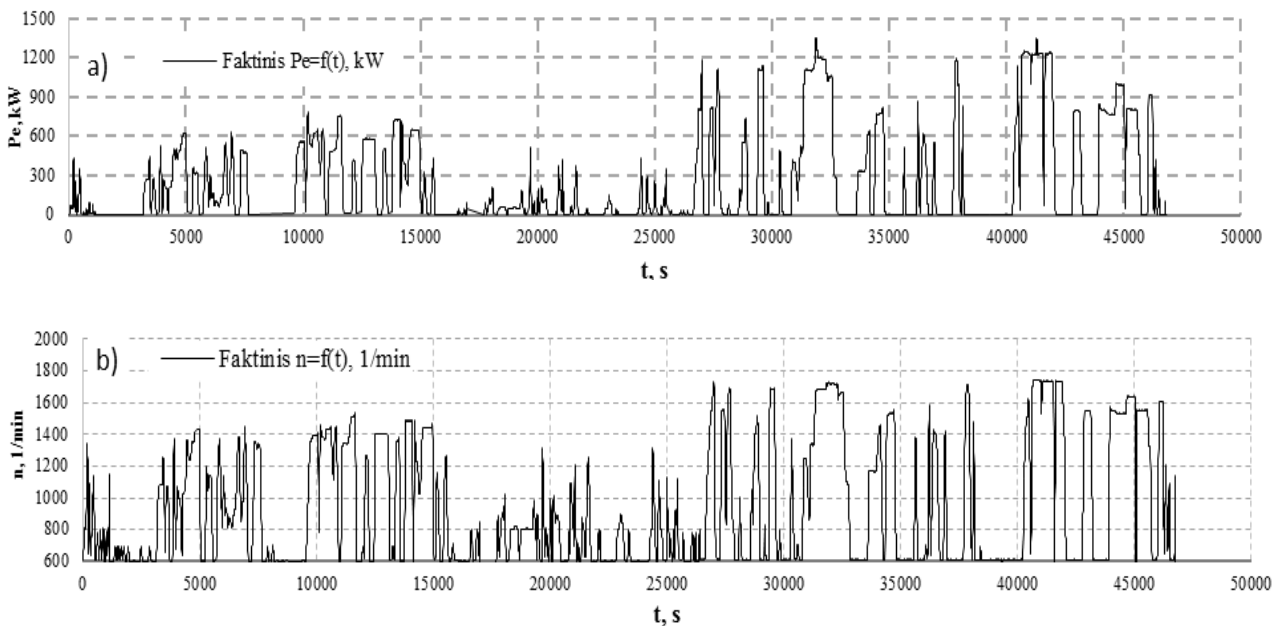
Tokia charakteristika dirba laivų su fiksuoto žingsnio sraigto eigos varikliai, taip pat ši charakteristika būdinga lokomotyvų dyzeliams. Dyzelio eksploatacinis ciklas pasižymi didelio dažnio apkrovos ir apskukų svyra-

vimu labai plačiame diapazone (1 pav. a – apkrova, b – apskukos). Esminiai dyzelinio variklio darbo pereinamaisiais režimais ypatumai glūdi parametų neatitikime lyginant su darbu nusistovėjusia apkrova, nusistovėjusios apkrovos metu paduodamo kuro kiekis, variklio apskukos, turbokompresoriaus parametrai yra beveik pastovūs pereinamajame režime visi šie parametrai nuolat kinta (Rakopoulos Giakoumis 2009).

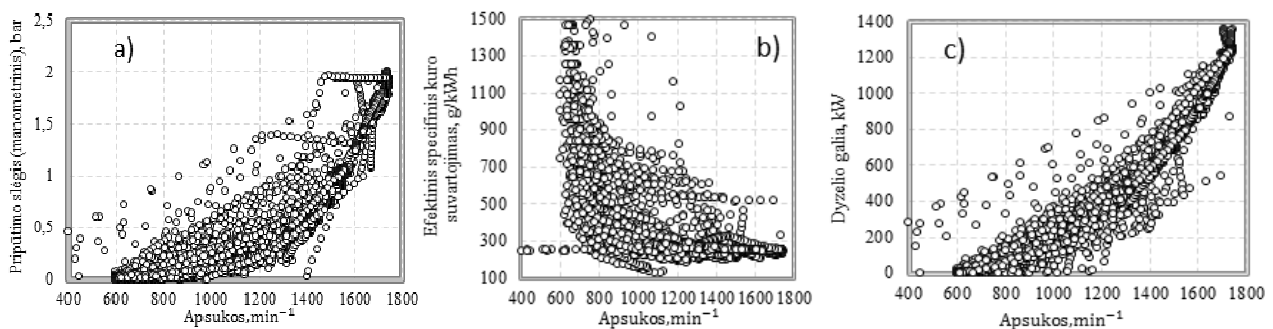
**1 lentelė.** Tyriuose naudoto dyzelinio variklio pagrindiniai parametrai (CAT3512B-HD spec.)

Parametras	Reikšmė
Markė	CAT3512B-HD
Galia, kW	1700
Sūkiai, min <sup>-1</sup>	1800
Cilindrų skaičius	12
Cilindro diametras, mm	170
Stūmoklio eiga, mm	215
Suspaudimo laipsnis	15,5

CAT3512B-HD variklio eksploatacinių parametų svyravimas pateiktas 2 paveiksle.



**1 pav.** Dyzelio apskukų ir apkrovos ciklo fragmentas realios eksploatacijos sąlygose. (a – galia, b – apskukos)



**2 pav.** CAT3512B-HD dyzelinio variklio a – pripūtimo slėgis, b – efektinis specifinis kuro suvartojimas, c – dyzelio galia realios eksploatacijos metu

## Metodika ir algoritmas

Vykdamas dyzelio eksploatacinius tyrimus pagrindinius tyrimo duomenis sudarė variklio vidinės elektroninės registravimo sistemos fiksuojami parametrai (65 parametrai fiksuojami 1–5 sek. dažniu). Tokio tipo duomenų registravimo sistemų adaptavimas variklių tyrimams leidžia ne tik mažesniais kaštais vykdyti dyzelių tyrimus (nereikia brangios įrangos, nebūtina transporto priemone išvesti iš eksploatacijos) tačiau ir leidžia išplėsti tyrimus į realios eksploatacijos sąlygas.

Eksploatacinių duomenų iš variklio vidinės registravimo sistemos apdorojimui ir adaptavimui pereinamųjų režimų tyrimams autoriai sukūrė ir adaptavo algoritmą „Dinamika“ (3 pav.). Algoritmo pagalba galima realizuoti dyzelinio variklio eksploatacinių duomenų analizę įvertinant pereinamųjų režimų įtaką lyginant ją su analogiškais parametrais varikliui dirbant nusistovėjusių apkrovą (variklio charakteristika dirbant nusistovėjusia apkrova pateikta 6 pav.). Dinamika algoritmo pagalba nustatytos variklio darbo charakteristikos atitinka gamintojo specifikacijas, kas patvirtina gautų rezultatų adekvatumą.

## Gauti rezultatai

Analizuojant transporto paskirties dyzelinio variklio CAT3512B-HD eksploatacinio ciklo duomenis (duomenų fragmentas pateiktas 1 pav.) gauti rezultatai leido įvertinti eksploatacinių parametru nuokrypius (4 pav.). Iš 4 paveikslė pateiktuose tyrimų duomenų fragmentuose matomi CAT3512B-HD eksploatacinių parametru nuokrypiai įvykstantis dėl pereinamųjų režimų įtakos.

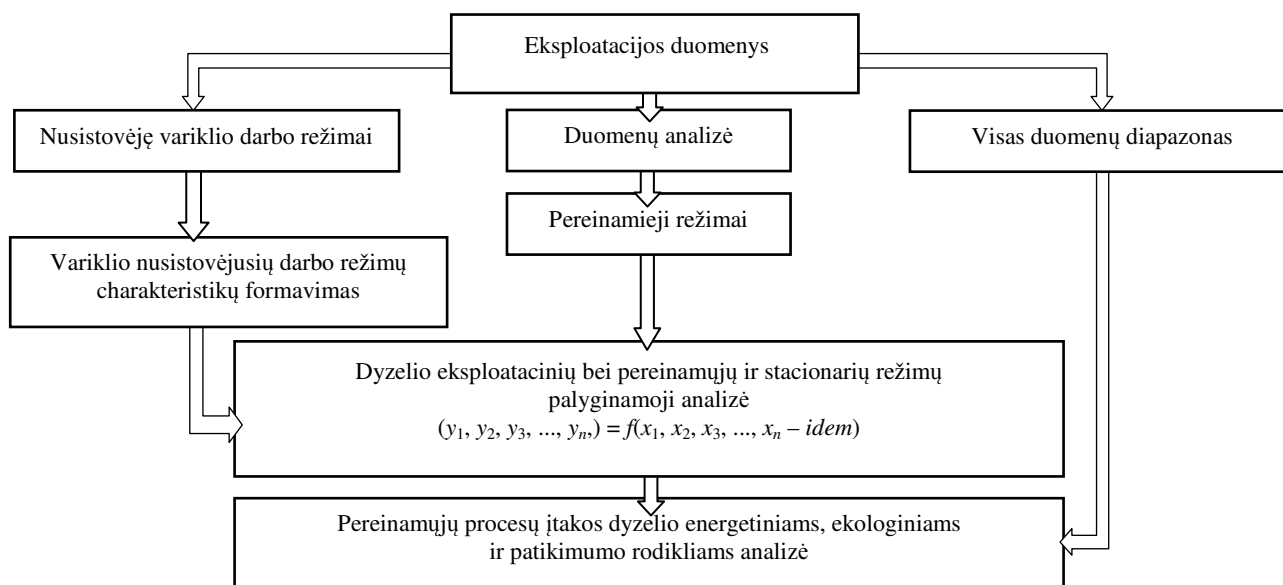
Įvertinti variklio galios, specifinio ir valandinio kuro suvartojimo nuokrypiai, pripūtimo slėgio svyravimas ir kt. Rezultatų fragmentas pateiktas 4 pav. Galios praradimas lyginant su darbu nusistovėjusiuose režimuose sudarė iki 300 kW, o dažniausias nuokrypis ~50 kW. (~3%). Pripūtimo parametru nuokrypis atskirais atvejais sudarė

iki 0,11 bar. Labiausiai vyraujantis  $\Delta P_k$  nuokrypis – 0,01–0,02 bar. Valandinio kuro suvartojimo svyravimas atskirais atvejais sudarė iki 5 kg/h. Integralinės vertės už eksploatacijos ciklą sudarė ~2 % nuo bendro suvartoto kuro kiekio.

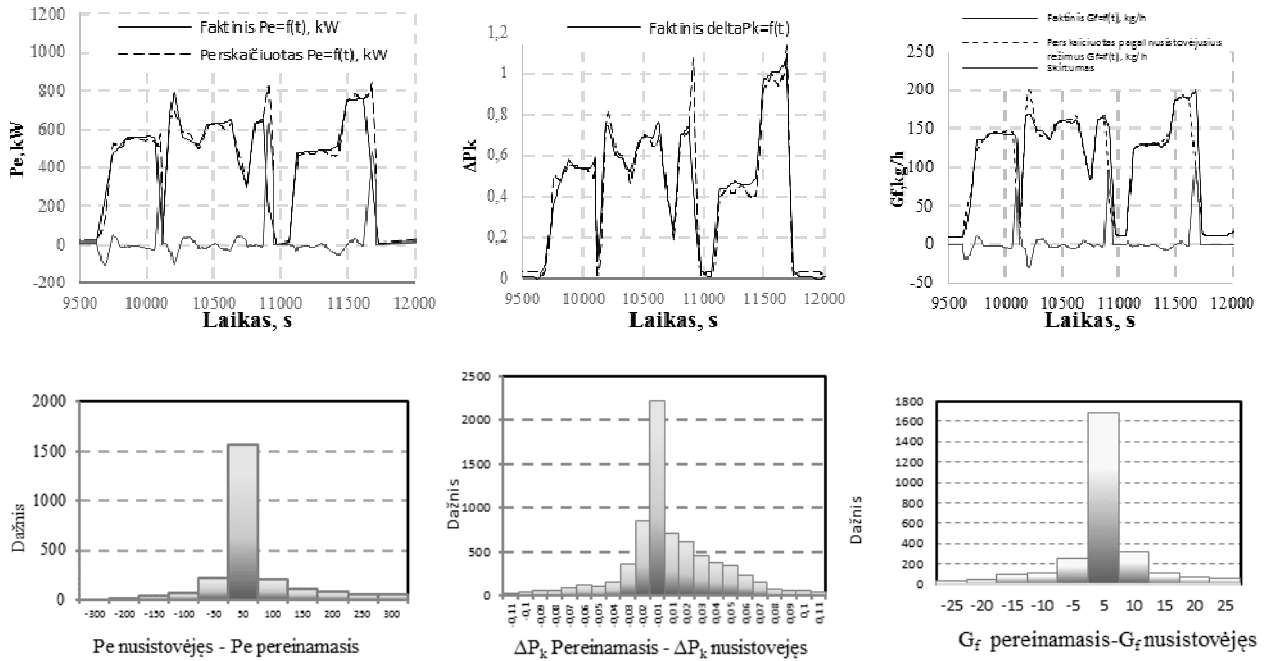
## Matematinio modelio parengimas

Gauti rezultatai naudojami AVL BOOST programoje sudarant CAT3512B-HD variklio matematinį modelį (5 pav.). AVL BOOST – pažangus kompleksinis vidaus degimo variklio modeliavimo įrankis, suteikiantis galimybę tiksliai modeliuoti vidaus degimo variklio darbo proceso ir ekologinių rodiklių parametru pokyčius, spręsti optimizacijos uždavinius (AVL BOOST version 2011.1). Lanksti programos struktūra leidžia naudoti iš anksto paruoštus vidaus degimo variklio konstrukcinius elementus (tarpinį oro aušintuvą, turbokompresorių ir kt.). Pradinėje modelio rengimo stadijoje šilumos išsiskyrimo modeliavimui naudojamas plačiai žinomas Vibe šilumos išsiskyrimo modelis. Kadangi modeliuojama variklio darbo charakteristika apimanti visą variklio apkrovos diapazoną, šilumos išsiskyrimu parametru perskaičiavimui naudojamas, AVL BOOST programoje numatytas, Woschni/Anisits modelis, kurio pagalba įvertinami Vibe formulės parametrai – degimo trukmė ir formfaktorius  $m$  priklausomai nuo variklio apsuokų. (AVL BOOST version 2011.1).

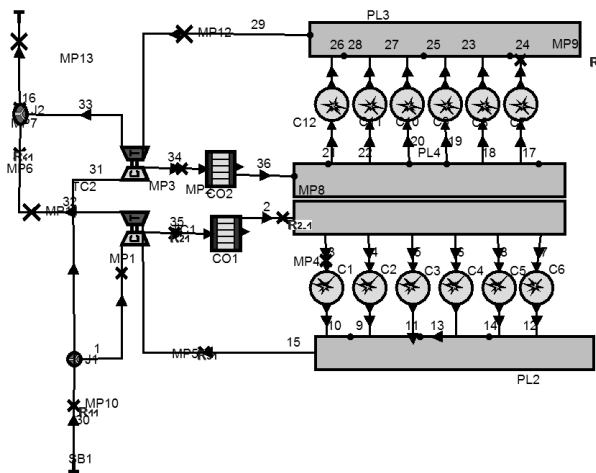
Pradinė suformuota modelio struktūra tinkamu būdu modeliuoja dyzelinio variklio su pripūtimu ir tarpiniu oro aušinimu eksploatacinius parametrus vidutinė pasiekta matematinio modelio paklaida, palyginus su eksperimentiniais duomenimis, 4÷6 % (žr. skaičiavimų pavyzdį pav. 6). Modelis bus panaudotas transporto paskirties dyzelių energetinių bei ekologinių rodiklių tyrimams eksploatacijos sąlygomis siekiant jų pagerinimo.



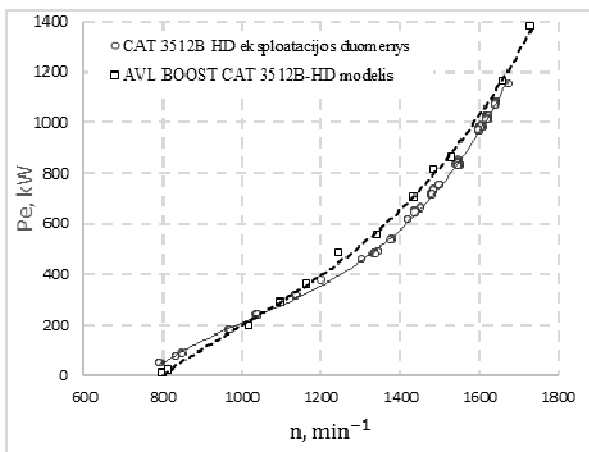
3 pav. Nusistovėjusių režimų formavimo komplekso „Dinamika“ algoritmas



4 pav. Nenusistovėjusių apkrovos režimų įtakos dyzelio eksploataciniams parametrams tyrimo rezultatų fragmentas



5 pav. CAT3512B-HD transporto paskirties dyzelinio variklio modelio schema AVL BOOST programoje



6 pav. Matematinio modeliavimo ir eksperimentinių rezultatų palyginimas, nusistovėjusiuose režimuose

## Išvados

Sukurta ir adaptuota šilumvežio CAT3512B-HD dyzelinio variklio technologija, kurios pagalba vertinama pereinamųjų režimų įtaka dyzelio variklio energetiniams parametrams. Gauti rezultatai liudija:

- Dyzelinių variklių galios pereinamuosiuose režimuose nukrypimai nuo atitinkamų nusistovėjusių režimų reikšmių eksploatacijos sąlygose siekia iki 300 kW, valandinio kuro suvartojimo nukrypimai iki 5–25 kg/h, tačiau visumoje už ciklo apimtį (šiuo atveju už šilumvežio išvyką) integralinių verčių nuokrypiai sudaro 2–3 %.

- Remiantis gautais eksploatacijos bei matematinio modeliavimo rezultatais kuriamas, AVL BOOST programos aplinkoje, transporto paskirties dyzelio CAT3512B-HD matematinis modelis

## Padėka

Straipsnio autoriai dėkoja „AVL advanced simulation technologies“ už suteiktą galimybę, remiantis sutartimi pasirašyta tarp AVL advanced simulation technologies ir VGTU transporto inžinerijos fakulteto, naudoti pažangias vidaus degimo variklio darbo proceso matematinio modeliavimo technologijas.

## Acknowledgment

Gratitude to AVL Advanced Simulation Technologies for provided opportunity, based on agreement signed between AVL Advanced Simulation Technologies and VGTU Faculty of Transport engineering, to use modern diesel engine simulation technologies. We hope to continue our co-operation in the future.

## Literatūra

- AVL BOOST VERSION 2011.1, Edition 12/2011. AVL LIST GmbH, Hans-List-Platz 1, A-8020 Graz, Austria.
- AVL BOOST. Vidaus degimo variklio matematinio modeliavimo programos aprašymas. Prieinama internete: <<http://goo.gl/lfiK2V>>.
- CAT3512B Caterpillar imonės tinklapis, jūrinės paskirties variklio specifikacijos. Prieinama internete: <<http://goo.gl/1vwcHP>>.
- CAT3512B DIESEL GENERATOR SETS. Caterpillar imonės tinklapis, dyzelinių generatorių specifikacijos. Prieinama internete: <<http://goo.gl/dbFJzu>>.
- CAT3512B-HD high displacement Caterpillar locomotive Engine. Variklio specifikacijos.
- Giakoumis, E. G.; Rakopoulos, C. D.; Dimaratos, A. M.; Rakopoulos, D. C. 2013. *Exhaust emissions with ethanol or n-butanol diesel fuel blends during transient operation: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 17 (2013)170–190.
- Lingaitis, L. P.; Lebedevas, S.; Liudvinavičius, L. 2014. *Evaluation of the operational reliability and forecasting of the operating life of the power train of the freight diesel locomotive fleet*. Maintenance and Reliability; Nr.16 (1): 73–79 p.
- Rakopoulos, C. D.; Dimaratos, A. M.; Giakoumis, E. G.; Rakopoulos, D. C. 2010. *Investigating the emissions during acceleration of a turbocharged diesel engine operating with bio-diesel or n-butanol diesel fuel blends*. Energy 35 (2010) 5173e5184.
- Rakopoulos, C.D.; Giakoumis, E. G. 2009. *Diesel engine transient operation*. Principles of operation and simulation analysis. National Technical University of Athens School of Mechanical Engineering, Springer. 387p.
- Rakopoulos, C.D.; Giakoumis, E.G. 2007. *Prediction of friction development during transient diesel engine operation using a detailed model*. Int. J. Vehicle Design, Vol. 44, Nos. ½.
- Weaver, C. S. 2006. *Start-up and idling emissions from two locomotives*. Final Report. Technology Advancement Office South Coast Air Quality Management District. Prieinama internete: <<http://goo.gl/7zURou>>.
- WHITE PAPER Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system. COM/2011/0144 final. Prieinama internete: <http://goo.gl/WKC4MA>.