



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

## „SUNKIŲJŲ“ DYZELINIŲ VARIKLIŲ EKOLOGINIŲ RODIKLIŲ STANDARTŲ KEITIMOSI TENDENCIJOS

**Ingrida Gudaitytė**

*JTF Jūreivystės institutas, Klaipėdos Universitetas, H. Manto g. 84*

*El. paštas: ingrida.gudaityte@ku.lt*

**Santrauka.** Straipsnyje pateikti standartų, reglamentuojančių kenksmingų komponentų emisijų normas, lyginamosios analizės rezultatai ir atitinkamų bandymo ciklų struktūros. Analizė atlikta remiantis norminiais aktais, skirtais „sunkiems“ dyzeliniams varikliams. Skirtingai nuo kelių transporto dyzelinių variklių ir ne kelių transporto dyzelių, šiuolaikiniai standartai (TierIII/Tier IV) sunkiems dyzeliniams varikliams (skirtiems naudoti laivuose ir geležinkelyje) numato bandymo ciklus išskirtinai nusistovėjusiuose režimuose. Parodytas sunkiųjų dyzelių tyrimų planavimo ir atlikimo pereinamuosiuose režimuose aktualumas.

**Reikšminiai žodžiai:** Dyzelinis variklis, pereinamieji režimai, apkrovos ciklas, ekologiniai rodikliai, kenksmingų komponentų emisija.

### Įvadas

Tradiciskai vidaus degimo variklio darbo tyrimai buvo vykdomi stacionariuose režimuose, tuomet, kai pereinamiesiems procesams buvo kreipiamas minimalus dėmesys. Tačiau dauguma kasdieninių operacijų yra atliekama būtent pereinamuosiuose (nususistovėjusiuose) režimuose. Stacionariams (arba nusistovėjusiems) režimams atitenka tik nedidelė variklio eksploatavimo laiko dalis, pavyzdžiui, laivo judėjimas atviroje jūroje. Istoriskai transporto dyzelių pereinamaisiais procesais pradėjo domėtis gamintojai 1960-iais metais, kai vidutinių apskų dyzeliuose buvo bandoma staigiai padidinti apkrovą nuo 0 % iki 100 %. Pereinamojo režimo sąlygomis keičiasi variklio apskukos ir degalų padavimas. Dėl šios priežasties išmetamųjų dujų energija kinta, įtakoja turbinos entalpijos kritimą ir per turbokompresoriaus veleną – sukimo momento balansą, taip pat turi įtakos pripučiamo oro slėgio padidėjimui. Dėl skirtingų dinaminių rodiklių cilindro užpildymas oru vėluoja palyginus su įpurškiamų degalų pasikeitimu. Tai neigiamai veikia dyzelinio variklio valdymo charakteristikoms. Šio vėlavimo rezultate didėja kietųjų dalelių, dujų ir triukšmo emisijos, žymiai viršydamos nustatytus pastoviam režimui, dydžius. (Rakopoulos, Giakoumis 2009) Tokiu būdu, pereinamoju procesu vadinamas funkcionaliai priklausančių variklio parametrų keitimosi laike procesas, vykstantis dėl dyzelinio variklio valdymo sistemos parametrų arba išorinių darbo sąlygų pasikeitimo.

Paskutiniu metu globalus susirūpinimas aplinkosaugos klausimais paskatino sustiprinti dėmesį transporto dyzelio nenusistovėjusių režimų tyrimams ir šiose režimuose variklio darbo rodiklių pagerinimui. Pripažįstant aukščiau įvardytus faktus, JAV, Japonijos ir ES direktyvos atkreipė gamintojų ir tyrėjų dėmesį į nenusistovėjusių transporto dyzelio režimus, įvedus pereinamųjų sertifikavimo ciklų formas naujoms transporto priemonėms (Rakopoulos, Giakoumis 2009).

ES išmetamųjų teršalų kiekis iš dyzelinių variklių transporto priemonėse pradėtas tikrinti nuo 1980-ųjų, naudojant sudėtingus standartizuotus trumpalaikius testus – važiavimo ciklus (Emission Test Cycles). Tai ilgai besitęsiantys testai (iki 30 min.), sudaryti iš greičio ir apkrovos pokyčių pagal skirtingos apkrovos algoritmus. Pereinamųjų režimų ciklas yra bandymo taškų seka, su nustatytu greičiu/sukimo momentu, lydinčiu transporto dyzelį pereinamųjų režimų sąlygose. Šie bandymo režimai yra susiję su nustatytais laiko tarpais (dažniausiai sekundės), kurių metu pagreitis išlieka pastovus. Toks standartizavimas yra pagrindas skirtingų tipų dyzelinių variklių, kurie atlieka tą pačią operaciją, palyginimui. Tam, kad testas imituotų dyzelinio variklio išmetamųjų teršalų matavimus realiose sąlygose, bandymai realizuojami reglamentuotose ribinėse sąlygose:

- esant šaltam ir karštam paleidimui;
- dažnam greičio didinimui ir mažinimui;
- apkrovos pokyčiams;
- tuščiosios eigos sąlygos, tipiškos miesto vairavimui;

- priemiesčio arba kaimo eksploatavimo sąlygoms;
- eksploatavimui greitkeliais (Emission Test Cycles).

Dabartiniu metu pereinamųjų režimų sertifikavimo procedūros skirtos praktiškai visų tipų dyzeliniams varikliams, išskyrus sunkiuosius transporto dyzelius. Laivų ir geležinkelio transportui skirtiems dyzeliniams varikliams iki šiol sertifikavimas vyksta nusistovėjusiuose režimuose. Straipsnyje atlikta standartų, naudojamų sunkiųjų dyzelių sertifikavimui, raidos analizė. Pristatyta medžiaga yra autoriaus kompleksinių tyrimų dalis, tikslu sukurti metodus ir technologijas, skirtus pagerinti eksploatuojamų „sunkiųjų“ dyzelinių variklių parametrus pereinamuosiuose režimuose.

Pagrindinis tyrimo metodas, panaudotas straipsnyje yra sunkiųjų dyzelinių variklių sertifikavimo procedūrų, mokslinių darbų ir publikacijų analitinė apžvalga. Šios analizės pagrindu bus suformuluoti tolimesnių problematikos tyrimų tikslai ir uždaviniai.

### Globalus ne kelių dyzelinių variklių emisijų reguliavimas

Dyzelinių variklių sertifikavimas yra vienas iš efektyvių mechanizmų, skatinančių jo tobulinimo technologijų vystymą. Toksinių medžiagų emisijų leistinų normų griežtėjimas priverčia variklių konstruktorius ir gamintojus ieškoti naujų kelių modernizuoti dyzelinius variklius. Kartu su valstybiniais standartais įvairios paskirties transporto dyzeliams galioja tarptautiniai standartai ir konvencijomis nustatytos kenksmingų medžiagų emisijų normos. Pavyzdžiui, laivų dyzeliniai varikliai taip pat sertifikuojami pagal MARPOL 73/78 konvenciją, geležinkelyje naudojami dyzeliniai varikliai turi atitikti Tarptautinės geležinkelių sąjungos (UIC) normų, automobilių transportas – EURO standartams ir t. t.

Todėl „sunkiųjų“ (laivų ir geležinkelio) transporto dyzelių ekologinių rodiklių perspektyvas ir užduotis tikslinga įvertinti remiantis normatyvų ir sertifikacijos metodų pasikeitimų laike analizę.

JAV vyriausybė pirmoji priėmė švaraus oro teisės aktus dėl automobilių variklių 1970 metais, po to dėl vilkikų variklių 1980-ųjų pabaigoje, ir ne kelių dyzelinių variklių – 1990. Buvo nustatyti azoto oksidų (NO<sub>x</sub>), angliavandenių (HC), anglies oksidų (CO) ir kietųjų dalelių (KD) emisijų leistinos normos, išreikštos g/kWh. Po JAV emisijos reglamentai buvo priimti visame pasaulyje.

Ne kelių transporto priemonėms kenksmingos emisijos skirstomos pagal variklio galią ir emisijų mažinimo etapus, vadinamus Tier. Tier 1 reikalavimai, skirti varikliams su 130–560 kWh<sup>-1</sup> galia, riboja NO<sub>x</sub> išmetimus iki 9,2 g/kWh ir KD iki 0,54 g/kWh. Tier 1 reikalavimai kitiems dyzeliniams varikliams įvesti 1997–2000 m. (Gui Xinqun 2010)

Akivaizdu, kad dyzelinių variklių rodiklių sertifikavimas nusistovėjusiuose režimuose tik apytiksliai atspindi transporto priemonių realias eksploatacijos sąlygas ir atitinkamai įvertina jų toksinių komponentų emisijas. Todėl pradėdant nuo 2001 numatoma visų pagrindinių kenksmingų emisijų normas sugriežtinti. Per 2001–

2015 m. laikotarpį NO<sub>x</sub> turi būti sumažintas nuo 9,2 kWh<sup>-1</sup> iki 0,4 kWh<sup>-1</sup>, o KD sumažintas nuo 0,54 kWh<sup>-1</sup> iki 0,4 kWh<sup>-1</sup> daugumai variklių. Papildomai pradėtos riboti HC, NMHC ir CO emisijos.

NO<sub>x</sub> normos griežtesnės varikliams su didesne galia, nes šių tipų varikliai turi didesnę cilindro tūrį, todėl jų bendra išleidžiamų kenksmingų emisijų apimtis yra didesnė. Tuomet naujų normų kenksmingų komponentų emisijų įvedimas „sunkiems“ dyzeliniams varikliams vyksta lėčiau palyginus su mažesnės galios dyzeliniais varikliais. Tai pagrįsta tuo, kad varikliai su didesne galia turi degimo proceso ypatumus, kurie neleidžia pritaikyti degimo proceso valdymo technologijų, naudojamų „lengvesniuose“ dyzeliniuose varikliuose.

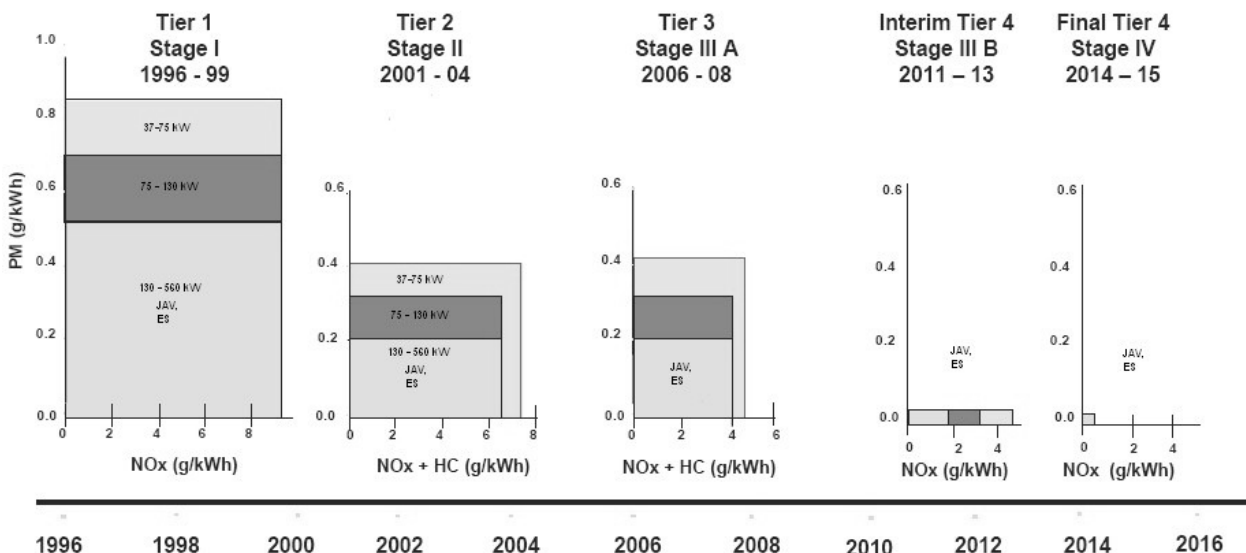
1 pav. grafine forma parodytos emisijų mažinimo perspektyvos JAV ir ES. Iš grafiko matosi, kad sertifikavimas pagal NO<sub>x</sub> ir KD komponentus sprendžia kompleksinę ekologinių rodiklių gerinimo užduotį (atsižvelgiant į NO<sub>x</sub> ir nepilno degimo produktų fizikinių mechanizmų sudarymą, o tai reiškia – atsižvelgiant į skirtingų faktorių įtaką). Naujų normų įteisinimas turi tendenciją sumažinti kenksmingų komponentų emisijas iki vienodo lygio visų tipų dyzeliniams varikliams. Dar viena tendencija – standartų unifikavimas. Tai pabrėžia kenksmingų emisijų kontrolės reikšmę pasaulyje ir leistų sumažinti variklių sertifikavimo procedūrų kiekį.

Jau iš 2006 metų normų akivaizdu, kad toks kenksmingų komponentų emisijų lygis gali būti pasiektas tik panaudojant elektronines valdymo sistemas, tokias, kaip Common Rail ir ne motorinius išmetamųjų dujų valymo metodus.

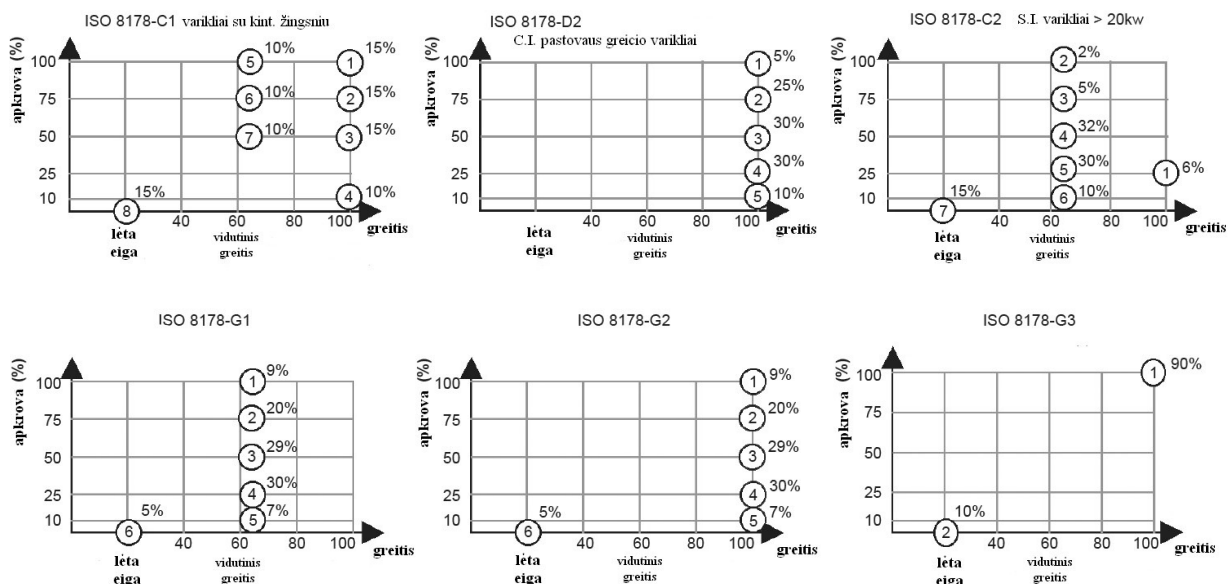
Automobilių transporto apimtis, suminis galingumas yra didesnis, šis transporto priemonių segmentas naudoja daugiau degalų, o tai reiškia, šių transporto priemonių darbo eigoje susidaro didesnis išmetamųjų dujų emisijų kiekis. Todėl emisijų mažinimo technologijų bei elektroninės valdymo sistemų vystymas sparčiausias būtent šiame transporto priemonių segmente. Technologijų vystymas „sunkiems“ transporto priemonėms vėluoja, kas taip pat atspindi standartų vystymo dinamiką.

JAV Tier 1 – Tier 3 reikalavimų sertifikacijai sunkiems transporto dyzeliams naudojamas 8 režimų stacionarus bandymo testas. ES naudoja NRSC bandymo ciklą (ISO 8178, 2 pav.). NRSC bandymo ciklas susideda iš dyzelinio variklio apkrovos ir greičio keitimo. Išmetamieji teršalai matuojami per nustatytą variklio darbo seką. (Worldwide Emissions Standards) Tier 4 reikalavimai sertifikacijai papildyti dar 2 testais, skirtais ne kelių transporto priemonėms – NTE zonai ir ne kelių pereinamųjų režimų bandymo ciklui NRTC. NTE zona yra nustatoma pagal sukimo momento kreives: 100 % variklio greičiui, 15 % greičiui, 30 % galios linijoms, ir 30 % sukimo momento linijai (4 pav., (EPA420-R-03-008, April 2003)).

NTE standartas nereikalauja atskirų bandymo procedūrų. Jo tikslas – galimybė atlikti patikrą pereinamųjų režimų ciklą, atliktų variklio elektroninės valdymo sistemos pagalba ir kenksmingų komponentų emisijų įvertinimas skaičiavimo būdu.



1 pav. Ne kelių transporto dyzelinių variklių Tier reikalavimų pasikeitimai (Gui Xinqun 2010)

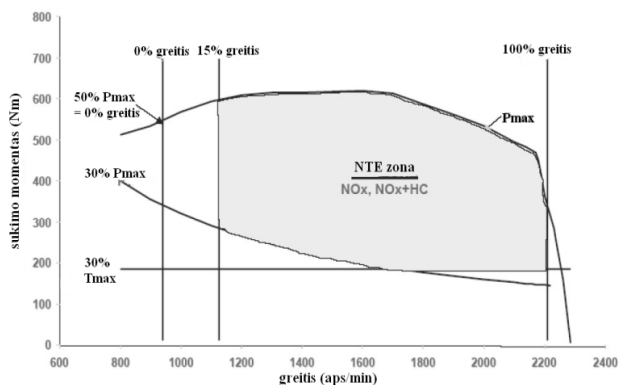


2 pav. NRSC bandymo ciklas (Worldwide Emissions Standards)

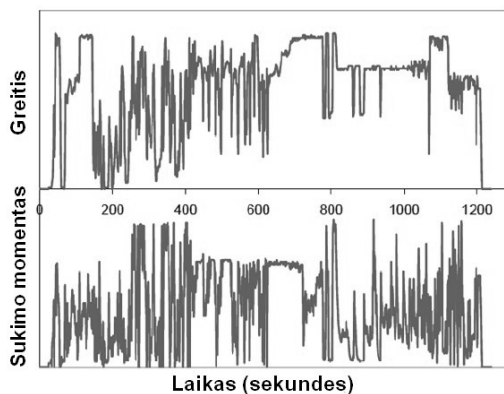
Toks emisijų apskaičiavimo būdas garantuoja, kad išmetamųjų dujų emisijos kiekis bet kuriame variklio darbo režime NET zonoje neviršis emisijų kiekio, susidarančio prie vidutinio valdymo lygio. Nuo 2011 metų NTE standartas taikomas varikliams virš 130 kW, nuo 2012 metų – varikliams su 56–130 kW galia, o nuo 2013 metų standartas taikomas varikliams su galia iki 56 kW. NTE standartas gali būti taikomas varikliams tiek sertifikacijos laiku tiek viso variklio eksploatacijos metu. (Emissions Reference Guide & Standards).

Ne kelių pereinamųjų režimų bandymo ciklas (NRTC), apibrėžtas laiko seka variklio apsisukimų dažnio ir sukimo momentu, kaip parodyta 4 paveiksle. Variklį reikia paleisti prisilaikant sekančių nurodymų. NRTC turi būti vykdomas du kartus: pirmą kartą paleidus, kai variklis yra 19,5 °C, kuris yra vadinamas šaltu variklio paleidimu, ir dar kartą pakartoti testą po 20 minučių po šalto paleidimo. Antras bandymo etapas vadinamas karštu

paleidimu. Nustatomos emisijos yra 5 % suma nuo šalto ciklo ir 95 % nuo karšto ciklo JAV ( atitinkama 10 % ir 90 % Europoje).



3 pav. NTE zonos apibrėžimas



4 pav. Tier 4 pereinamųjų režimų bandymo ciklas (NRTC)

Dabartiniu metu NTE ir NRTC sertifikavimo procedūros taikomos ne kelių transporto priemonėms. Tuomet „sunkieji“ dyzeliniai varikliai (naudojami geležinkelyje ir laivyboje) kol kas sertifikuojami išskirtinai nusistovėjusiuose režimuose. Pereinamųjų režimų bandymo ciklai remiasi variklio valdymo blokų duomenimis.

#### Išvados

Kelių transporto priemonių sertifikavimo procedūros remiasi bandymo ciklais, imituojančiais dyzelinio variklio darbą realiose eksploatacijos sąlygose. Didžioji dyze-

linio variklio eksploatacijos laiko dalis yra susieta su darbu nenusistovėjusiuose režimuose. Tuomet „sunkiųjų“ dyzelinių variklių sertifikavimas šiai dienai numato bandymus tik nusistovėjusiuose režimuose, kas tik dalinai atspindi variklio darbą realiose eksploatacijos sąlygose. Todėl kenksmingų komponentų emisijų normos varikliams su didesne galia numato griežtesnius reikalavimus. Tačiau naujų standartų įvedimas skatina tirti faktorius, įtakančius kenksmingų emisijų susidarymui dyzeliniuose varikliuose ir ieškoti būdų jas sumažinti.

Remiantis aukščiau aprašytais faktais akivaizdu, kad „sunkiųjų“ dyzelinių variklių emisijų normavimo pradžia sutampa su elektroninių valdymo sistemų įvedimu į variklio konstrukciją. Elektroninės valdymo sistemos leidžia įvertinti išmetamųjų emisijų kiekį pereinamuosiuose režimuose. Todėl pereinamiems režimams skiriamas pagrindinis dėmesys siekiant pagerinti transporto dyzelio ekologinius ir ekonominius rodiklius (tikslas atrasti efektyvesni ir tikslesni elektroninių valdymo sistemų darbo algoritmą). Čia vienas iš svarbiausių aspektų yra faktoriai, turintys įtaką toksinių komponentų sudarymui, jų identifikavimas ir sąsajų su eksploatacijos ciklo parametrais nustatymu.

Sprendžiant sunkiųjų dyzelinių variklių eksploatacinių rodiklių gerinimo užduotis būtini jų darbo pereinamųjų procesų rodiklių kompleksiniai skaičiavimai ir eksperimentiniai tyrimai.

#### Literatūra

Draft Regulatory Impact Analysis (EPA420-R-03-008, April 2003) <http://www.epa.gov/otaq/cleaner-nonroad/>.

Emission Test Cycles. <https://www.dieselnet.com/standards/>.

Emissions Reference Guide & Standards <http://www.gsgnet.net/gsgpdfs/EmissionsStandards.pdf>.

Gui Xinqun, Danan Dou, and Richard Winsor *Non-Road Diesel Engine Emissions And Technology Options For Meeting Them*. ASABE Distinguished Lecture #34, pp. 1–24. Agricultural Equipment Technology Conference, 10–13 January 2010, Orlando, Florida, USA.

Overview and Trends in Worldwide Emission Legislations [https://www.avl.com/c/document\\_library/get\\_file?uuid=c0522faf-ab75-4708-a9e5-d04e95e4e1fd&groupId=17818](https://www.avl.com/c/document_library/get_file?uuid=c0522faf-ab75-4708-a9e5-d04e95e4e1fd&groupId=17818).

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.

*Worldwide Emissions Standards. Heavy Duty and Off-Highway Vehicles*. Delphi Innovation for the Real World 2013/2014 <http://delphi.com/pdf/emissions/Delphi-Heavy-Duty-Emissions-Brochure-2013-2014.pdf>.