



18-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos

TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,

vykusios 2015 m. gegužės 6 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 18th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'

TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 6 May 2015, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 18-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»

ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 6 мая 2015 г., Вильнюс, Литва

DYZELINIŲ VARIKLIŲ EKOLOGINIŲ PARAMETRŲ KONTROLĖS MATEMATINIAI MODELIAI

Ingrida Gudaitytė

JTF Jūrėivystės institutas, Klaipėdos Universitetas, H. Manto g. 84

El. paštas: ingrida.gudaityte@gmail.com

Santrauka. Publikacijoje nagrinėjami transporto dyzelinių variklių matematiniai modeliai, skirti kenksmingų komponentų emisijos kontrolei. Pristatyta kenksmingų komponentų emisijų kontrolės matematinių modelių apžvalga, atlikta jų palyginamoji analizė. Įvertintas kenksmingų komponentų emisijų kontrolės matematinių modelių pritaikymas variklio nenusistovėjusiųjų režimų analizei. Nagrinėti modeliai taip pat įvertinti dėl jų pritaikymo sunkiuose dyzeliniuose varikliuose, naudojamuose laivuose ir lokomotyvuose.

Reikšminiai žodžiai: Dyzelinis variklis, nenusistovėjusieji režimai, matematiniai modeliai, ekologiniai rodikliai, kenksmingų komponentų emisija.

Įvadas

Dyzelinių variklių ekologinių parametų kontrolė ir tobulinimas yra aktualus tiek dėl šio tipo variklių paplitusio naudojimo įvairiose transporto priemonėse, tiek dėl susirūpinimo pasaulyje ekologijos gerinimo klausimais. Tuo tikslu naudojami eksperimentinių procesų, vykstančių dyzeliniuose varikliuose, tyrimai arba jų matematinis modeliavimas. Tačiau išmetamųjų dujų emisijų mažinimo problema iki šiol nėra išsamiai ištirta. Kaip rodo statistika, faktinis dyzelinių variklių kenksmingų komponentų emisijų kiekis viršiję nustatytas normas (UNECE, 2014). Viena iš priežasčių yra ta, kad didžiąją eksploatacijos laiko dalį dyzelinis variklis dirba nenusistovėjusiais režimais, tai numato detalą daugiafaktorinę dyzelinio variklio darbo procesų optimizaciją tiek nusistovėjusiais tiek nenusistovėjusiais režimais.

Eksperimentiniai kontrolės metodai, skirti įvertinti dyzelinio variklio įtaką aplinkai, turi tam tikrus naudojimo apribojimus (pavyzdžiui, reikalauja didelių kaštų matavimo technikai). Tai skatina poreikį kurti naujus, patikimus, tikslius dyzelinių variklių kenksmingų komponentų emisijų vertinimo metodus. Dyzelinio variklio ekologinių parametų modeliavimas šiuo metu tapo atskira mokslo šaka, pasižyminti metodų ir idėjų įvairove (Сковородников *et al.* 2009). Atskiri ekologinių parametų duomenų surinkimo ir apdorojimo procesai pasiekė aukštą organizacijos ir sąryšio lygį. Tai leidžia sujungti juos į vieną informacinį kompleksą, kuris spręstų ne tik

variklių ekologinių parametų įvertinimą, bet taip pat padėtų prognozuoti šiuos parametrus eksploatacijos sąlygomis.

Egzistuojančius ekologinių parametų kontrolės modelius galima padalinti į dvi grupes pagal naudojamos analizės paskirtį. Pirmai grupei priskirčiau modelius, skirtus transporto priemonių kenksmingų medžiagų emisijų įvertinimui didelio regiono mastelyje. Tokiais modeliais remiamasi sudarant norminius dokumentus, reglamentuojančius kenksmingų komponentų emisijos apribojimus skirtingų tipų transporto priemonėms. Kita grupė – tai atskirų transporto priemonių tipų ekologinių parametų įvertinimas, skirtas naudojamų variklių ekologinių bei energetinių parametų tobulinimui. Šio straipsnio tikslas – sunkiojo dyzelinio variklio, naudojamo laivuose ir lokomotyvuose, kenksmingų komponentų emisijų kontrolės matematinių modelių apžvalga ir pritaikymas nenusistovėjusiųjų režimų analizei.

Kenksmingų komponentų emisijų iš dyzelinių variklių prognozės matematiniai modeliai

Jau keli dešimtmečiai JAV valstybinės oro taršos prevencijos tarnybos, tokios kaip Aplinkos apsaugos agentūra (Environmental Protection Agency's MOBILE, EPA Mobil) ir Kalifornijos oro resursų departamentas (California Air Resources Board's EMFAC), naudoja mobilių šaltinių emisijų modelius, kurie remiasi prielaida, kad transporto priemonė gali būti pristatoma kaip integruota reikšmė

konkrečiame judėjimo cikle, kurios greitis reguliuojamas pataisos koeficientais. JAV bendras požiūris į emisijų modeliavimą susideda iš 2 žingsnių, parodytų 1 paveiksle. Pirmas žingsnis – nustatomas išmetimų koeficientų rinkinys, kuris apibūdina emisijų sukūrimo greitį. Antrame žingsnyje įvertinamas transporto priemonės aktyvumas. Galutiniame etape emisijos skaičiuojamos sudauginant šių žingsnių rezultatus tarpusavyje (Barth *et al.* 1996).

Aptarnaujant ir palyginant emisijų modeliavimo metodikas priimta remtis šiais komponentais:

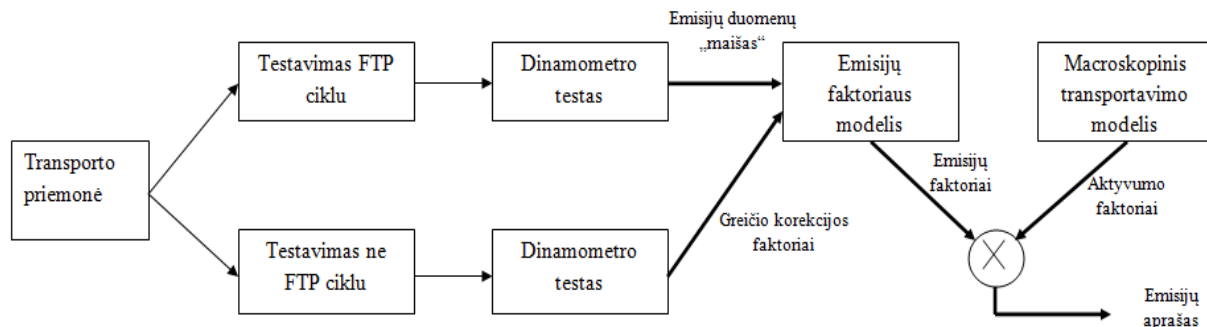
1. Kokiu būdu testuojama transporto priemonė;
2. Emisijų pateikimas (t. y. kokiu būdu emisijos pristatomos modelyje);
3. Transporto priemonių aktyvumo faktorius (t. y. kokie transporto priemonės aktyvumo parametrai buvo panaudoti emisijų nustatymui – didelio regiono mastelyje arba mažo atskiro kelio mastelyje).

Lentelėje 1 pateikti kelių modeliavimo metodologijų naudojami komponentai. Paveiksle naudojamas terminas emisijų duomenų „maišas“ – tai kenksmingų medžiagų vertinimo būdas. Dujos prieš vertinant jų koncentracijas yra surenkamos į specialią kamerą. Taip daroma todėl, kad dujų analizatoriams reikalingas laikas nustatyti emisijų koncentracijas.

Tačiau kaip parodė dauguma tyrimų, transporto priemonių eksploatacijos sąlygomis kenksmingų medžiagų emisijos gali smarkiai skirtis nuo naudojamų modelių prognozės. Todėl paskutiniai modeliavimo metodai numato fizikinių procesų, vykstančių variklyje, aprašymą ir

remiasi analitinę emisijų susidarymo analizę. Faktiniame modelyje kenksmingų medžiagų išmetimo procesai dalinami į komponentus atitinkantiems fizikiniams reiškiniams, vykstantiems eksploatuojant transporto priemones. Kiekvienas komponentas modeliuojamas kaip analitinė išraiška susidedančia iš įvairių parametų, būdingų šiam procesui. Šie parametrai skiriasi priklausomai nuo transporto priemonės tipo, naudojamo variklio ir emisijų mažinimo technologijų. Dauguma iš parametų lengvai prieinami, nes nurodyti gamintojo specifikacijoje (pvz., transporto priemonės masė, variklio tūris ir t. t.). Kiti raktiniai parametrai, susiję su transporto priemonės eksploatacija, gaunami iš testavimo procedūrų.

Kuriant plataus diapazono transporto priemonių modelius dalyvavimas eksperimentiniuose tyrimuose yra kur kas mažesnis, negu emisijų kartografijos kūrimas pagal operatyvius taškus. Kiekvienais metais šie modeliai vis sudėtingėja. Pavyzdžiui, modeliai, sukurti iki 1980-ųjų metų prognozavo tik kelių kenksmingų komponentų emisijas iš benzininių variklių remiantis sertifikacijos testais. Šiuolaikiniai modeliai turi tendenciją jungti savyje visas atitinkančias transporto priemones, dirbančias su skirtingos konstrukcijos varikliais, naudojančias skirtingą kurą. Šiuose modeliuose įvertinami tiek reguliuojamos norminiai aktais kenksmingos medžiagos tiek nereguliuojamų komponentų emisijos bei kuro sunaudojimas, o patys modeliai remiasi moksliniais kenksmingų medžiagų išmetimo kontrolės tyrimais, kurie skirti atvaizduoti realią eksploatacijos situaciją (Smit *et al.* 2010).



1 pav. Šiuolaikinis emisijų aprašo procesas (Barth *et al.* 1996)

1 lentelė. Emisijų modelių sudedamieji komponentai (Barth *et al.* 1996)

Emisijų modeliavimo metodai	Transporto priemonės testavimas	Emisijų pristatymas	Transporto priemonės aktyvumo faktoriai
Šiuolaikiniai modeliai (pvz., EMPAC, MOBILE)	FTP ciklas (ir pagalbinis greitį koreguojantis faktorių testas)	Bendros viso ciklo emisijos	Transporto priemonės greitis (su greičio korekcijos faktoriais)
Daugkartinis testavimas	Daugkartinis testavimo ciklas pagal kelių ir jo apkrovos tipą	Bendros emisijos kiekvienam vairavimo ciklui	Vidutinės apkrovos greitis kiekvienam kelio tipui
Greičio – pagreičio matrica	Kassekundinis emisijų testavimas visiems režimams	Vidutinės emisijos kiekviename greičio – pagreičio režime	Laiko sąnaudos greičio – pagreičio matricioje
Emisijų kartografija	Kassekundinis emisijų testavimas	Emisijų žemėlapis variklio galios ir greičio režimams	Variklio galia ir greitis (turi būti perduotas iš kassekundinio greičio profilio)
Fizikinės parametrizacijos modelis	Trumpas vairavimo ciklas nustatyti pagrindinius parametrus	Analitinės parametrizacijos pristatymas	Kassekundinis profilis ir/arba nustatytos kelionės charakteristika

Egzistuoja daugelis priežasčių, kodėl atsiranda skirtumas tarp skaičiavimo ir faktinių kenksmingų komponentų emisijų: emisijų valdymo sistemos netiksli matematinė išraiška; neadekvatus eksploatuojamo transporto priemonių parko įvertinimas; neadekvatus vairavimo ypatumų bei transporto priemonių aktyvumo įvertinimas; nepakankama šiuolaikinių emisijų prevencijos priemonių apskaita; prastas palyginimas emisijos duomenų su eksploatuojamų transporto priemonių ir pan. (Barth *et al.* 1996; Rakopoulos *et al.* 2009).

Kenksmingų komponentų emisijų iš dyzelinių variklių kontrolės matematiniai modeliai

Šiuolaikinius kenksmingų medžiagų susikūrimo modelius variklyje, orientuotus į teršalų kontrolę, galima suskirstyti į tris kategorijas:

- Empiriniai modeliai;
- Fenomenologiniai modeliai;
- Hidrodinamikos trimatės modeliai (HTM).

Fenomenologiniai ir HTM modelių pagrindas dažniausiai yra alkūninio veleno pasukimo kampas ir išsami aprašyti procesai, vykstantys variklio cilindre. Dėl didelės apimties skaičiavimų šie modeliai nėra tinkami pereinamųjų procesų modeliavimui, nes variklio nenusistovėjusieji režimai trunka trumpą laiką. Tai reiškia, kad dyzelinio variklio išmetamųjų dujų emisijų vertinimas turi būti atliekamas daug greičiau nei realiu laiku. Įvykis arba laikas, kurio pagrindžiami empiriniai modeliai, skaičiavimo kiekio požiūriu yra efektyvesni. Todėl tokie modeliai gali būti naudojami kuriant realaus laiko modelius. Tipiški šios klasės modelių pavyzdžiai yra „Juodosios dėžės“ (Benz 2010). Juodoji dėžė – tai sistema, turinti „įėjimą“ informacijos surinkimui ir „išėjimą“ darbo rezultatų atvaizdavimui. Paplitęs terminas „juodoji dėžė“ reiškia, jog galima išoriškai stebėti sistemos darbą, tačiau nėra galimybės sužinoti, kas jo viduje. Kadangi vidaus sistemos struktūra nėra žinoma, įėjimo/išėjimo elgesys modeliuojamas naudojant dirbtinių neuronų tinklų metodą arba naudoja polinomialinius algoritmus.

Tokios „juodosios dėžės“ modeliavimo trūkumas yra didelis matavimų kiekis, reikalingas parametru nustatymui. Daugybė parametru riboja pritaikymą tokių modelių kitų tipų varikliams ar net kitiems operaciniams taškams. Šiuo požiūriu, modeliavimo rezultatai dažniausiai turi blogą pritaikymą, jei matavimo duomenys yra už kalibravimo diapazono ribų. Ypač tai liečia parametrizuotus modelius (modeliavimas, naudojant modelio elementu parametrus ir santykius tarp šių parametru), blogi rezultatai gali atsirasti kai kuriose darbo diapazonuose.

Paprastas polinomialinis metodas paminėtas (Benz 2010; Gärtner 2001) darbuose, aprašant statistinį NOx emisijos modelį. Šis modelis remiasi fizikiniais dėsniais, aprašant sistemos įėjimus, todėl modelį galima pritaikyti skirtingų tipų varikliams. Naudojamos sekančios proceso kintamosios: kuro degimo centras, deguonies masė cilindre ir jo bendra masė cilindre prie įsiurbimo vožtuvo. Įėjimai parenkami naudojant ekspertų žinias. Modelis buvo išbandytas naudojant daugelio variklių, dirbančių sunkiomis eksploatacijos sąlygomis, statistinių duomenų

kiekį tikslu parodyti modelio pritaikymą įvairiems variklio tipams.

Kvazi-statinis metodas yra aprašytas (Rakopoulos *et al.* 2009). Pereinamųjų režimų emisijos apskaičiuojamos pagal pagrindinį statinį žemėlapi, naudojant nenusistovėjusiųjų režimų pataisos koeficientus, kurie iš esmės yra oras/kuras faktinio santykio funkcijos. Modeliai tikrinami keliuose varikliuose, rodant didžiausią santykinę paklaidą maždaug 30 % pereinamųjų režimų metu.

Dirbtinių neuronų tinklų (an artificial neural network, ANN) metodas (Benz 2010) pagrįstas kintamaisiais – slėgiu, atsirandančiu, pavyzdžiui, degimo centre, maksimaliu šilumos išskirimo greičiu arba didžiausiu stacionarių matavimų slėgiu. ANN tikrinamas pereinamųjų režimų testo matavimo duomenimis. Simbolinės regresijos algoritmas (Sr) ieško funkcinių ryšių tarp įvesties ir išvesties duomenų, kas veda prie reikiamo parametru skaičiaus sumažėjimo. Simbolinė regresija – tai metodas, leidžiantis sumažinti reikiamų parametru skaičių, remiantis genetinėmis programavimo technologijomis (Benz 2010).

Dyzelinio variklio nenusistovėjusiųjų režimų modeliavimo ypatumai

Pereinamųjų (arba nenusistovėjusiųjų) režimų tyrimai prasidėjo 1960-aisiais, kai variklio gamintojai pastebėjo, jog varikliui dirbant aukšta apkrova arba keičiant ją, atsiranda įvairių sutrikimų. Termodinaminio ciklo modeliavimas, sukurtas per daugelį metų, suteikė prieigą prie duomenų, kurie priešingu atveju galėtų būti įvertinti tik naudojant sudėtingus ir brangius metodus. Be to, modeliavimas suteikia galimybę tyrinėti įvairius projektinius sprendimus, pradinėse projektavimo stadijose, optimizuoti pagrindinius sistemos parametrus ir atlikti jautrumo analizę. Dėl šios priežasties matematinis modeliavimas tapo vertingu įrankiu variklio dizaineriams ir gamintojams.

Dyzelinio variklio pereinamųjų režimų eksploatacijos modelis, imituojantis darbą eksploatacijos sąlygomis turi:

1. Būti sudarytas iš aukštos kokybės submodelių, imituojančių visų variklio posistemių darbą;
2. Turėti adekvačią įvairių procesų, vykstančių dyzeliniame variklyje analitinę išraišką ir atspindėti pagrindinių parametru įtaką kenksmingų komponentų emisijų susidarymui;
3. Turi būti lankstus ir remtis minimaliu empiriniu duomenų kiekiu;
4. Turi greitai apdoroti gaunamus duomenis;
5. Būti modulinis tam, kad modelį galima būtų papildyti naujomis programomis;
6. Būti lengvai adaptuojamas įvairių variklių tipams ir darbo sąlygoms (Rakopoulos *et al.* 2009).

Dyzelinio variklio simulatorių tyrimų rezultatai, liečiantys pereinamuosius režimus, remiasi ankstesniais nusistovėjusiųjų procesų matematinio ir termodinaminio modeliavimo skaičiavimais variklio cilindro ir jo posistemių viduje. Tokie modeliai derina analitinius ir empirinius metodus tikslu aprašyti variklio elementus. Jie gali būti klasifikuojami pagal modelio sudėtingumo lygį.

Analitiniai modelio elementai orientuoti į variklių kintamųjų variacijas, tuomet empiriniai metodai naudojami vidutinių reikšmių prognozei arba variklio pagrindinių kintamųjų įtakos tendencijų nustatymui.

Modeliai, naudojami pereinamųjų režimų modeliavimui gali būti:

- Linijiniai, kai visos modelio funkcijos ir ryšiai priklauso nuo įvedamų duomenų;
- Kvazi linijiniai. Dažniausiai jie remiasi fizikiniu variklio procesu sub-modeliu, o ne empirinėmis koreliacijomis;
- Fenomenologiniai. Į šių modelių sudėtį įeina įvairių procesų modeliavimo moksliniai principai. (Rakopoulos *et al.* 2009)

Skirtingi matematiniai modeliai yra geras pagrindas transporto dyzelio pereinamųjų režimų tyrimams eksploatacijos metu. Tačiau dauguma modelių aprašo nusistovėjusius režimus, todėl įprastų modeliavimo metodų naudojimas pagal nusistovėjusius požyūrius negali būti panaudotas variklio pereinamųjų režimų modelio kūrimui. Ypač tai aktualu aprašant degimo ir trinties procesus, vykstančius variklyje, o taip pat aprašant įvairius variklio posistemius, kaip, pavyzdžiui, turbokompresorius. Išmetamųjų dujų kenksmingų komponentų emisijų prognozė nors ir klestinti mokslo sritis variklio nusistovėjusiose režimuose, tačiau naudojami metodai gali labai ribotai panaudoti aprašant pereinamųjų režimų tyrimams. Pagrindiniai sunkumai yra aprašant termodinaminius

procesus variklio cilindre ir duomenų poreikio didelio skaičiaus variklio testo ciklų.

Išvados

Šiuolaikinius matematinius modelius galima padalinti į dvi grupes pagal naudojamos analizės paskirtį – į kenksmingų komponentų emisijų prognozės modelius, vertinančius kenksmingų medžiagų išmetimus regiono mastelyje ir modelius, skirtus naudojamų variklių ekologinių bei energetinių parametų tobulinimui. Modeliai, skirti išmetamųjų dujų emisijų prognozėms naudoja emisijas mažo arba didelio regiono statistinių duomenų analizei. Todėl sunkiųjų dyzelinių variklių ekologinių parametų gerinimo tikslams eksploatacijos sąlygomis bus naudingi analizės metodai modelių, skirtu variklių ekologinių bei energetinių parametų tobulinimui. Svarbus šiame tikslu žingsnis – nenusistovėjusių variklio darbo režimų analizė.

Sunkaus dyzelinio variklio modelis, imituojantis darbą eksploatacijos sąlygomis turi atspindėti variklio darbą nusistovėjusiais ir nenusistovėjusiais režimais. Matematinio metodo pasirinkimui ir dyzelinio variklio ekologinių parametų analizės kokybei didelę įtaką turi pradiniai duomenis. Tam tikslui modelis turi remtis minimaliu empiriniu duomenų kiekiu, turi būti sudarytas iš submodelių, imituojančių visų variklio posistemų darbą, turėti adekvačią įvairių procesų, vykstančių dyzeliniame variklyje analitinę išraišką ir atspindėti pagrindinių parametų įtaką kenksmingų komponentų emisijų susidarymui.

Literatūra

- Barth, M.; Feng, An.; Norbeck, J.; Ross, M. 1996. Modal emissions modeling a physical approach, *Transportation research record* 1520: 81–88. Prieiga per internetą: <<http://www.cert.ucr.edu/cmcm/docs/TRR1996-Physical-Approach.pdf>>.
- Benz, M. 2010. *Model-based optimal emission control of diesel engines*. Daktaro disertacijos pristatymas.
- Gärtner, U. *Die Simulation der Stickoxid-Bildung in Nutzfahrzeug-Dieselmotoren*. Ph. D. dissertation, University of Darmstadt, 2001. http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2014/itc/Diesel_Engines_Exhausts.pdf.
- 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. 387 p.
- Rakopoulos, C. D.; Giakoumis, E. G. 2006. *Review of Thermodynamic Diesel Engine Simulations under Transient Operating Conditions*. SAE International <http://users.ntua.gr/vgiakms/pdf/2006-01-0884.pdf>.
- Smit, R.; Ntziachristos, L.; Boulter, P. 2010. Validation of road vehicle and traffic emission models – A review and meta-analysis, *Atmospheric Environment* 44 (2010): 2943–2953. Prieiga per internetą: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135223101000395X>>.
- United nations economic commission for europe (unece), 2014. Diesel Engine Exhausts: Myths And Realities.
- Сковородников, Е. И.; Гришина, Ю. Б.; Ахметов, С. И.; Минитаева, А. М. 2009. Математическое моделирование экологических характеристик дизельных двигателей, *Омский научный вестник* 2(80): 147–149.