

## Variklio Hyundai Man B&W S50ME-B9 esminių konstrukcijos pakeitimų poveikio pagrindiniams variklio parametrams vertinimas

Eugenijus Žagaras\*

Lietuvos aukštoji jūreivystės mokykla  
I. Kanto g. 7, Klaipėda, Lietuva, tel. nr. +370 46 397 240  
El. paštas e.zagaras@lajm.lt

(Gauta 2019 m. sausio mėn.; atiduota spaudai 2019 m. balandžio mėn.; prieiga internete nuo 2019 m. gegužės 10 d.)

### Anotacija

Pagrindinė tyrimo idėja yra išskirti naujos kartos laivų variklių konstrukcijos ypatumus, kurių įdiegimą galima prilyginti visų vidaus degimo variklių gamybos revoliucijai. Tyrimu nustatyta, kad variklio HYUNDAI MAN B&W S50ME-B9 konstrukcijos pakeitimai daro reikšmingą poveikį variklio ekonominiams ir emisijos rodikliams.

**Reikšminiai žodžiai:** vidaus degimo variklis, išmetamųjų dujų temperatūra, galia, variklio emisija.

### Abstract

The main idea of the research is to highlight the peculiarities of new generation ship engines, the implementation of which can be equated to a revolution in the production of all internal combustion engines. According to the analysis of the essential changes in construction process of HYUNDAI MAN B&W S50ME-B9 engine it can be stated, that the changes of the construction have impact on the engine's economic and emission performance.

**Key words:** Internal combustion engine, temperature of the emission gas, power, engine emission

### Įvadas

Praėjusio šimtmečio pabaiga ir šio amžiaus pradžia pasižymėjo sparčiu pramonės augimu. Tai lėmė sparčią jūrų transporto plėtrą bei kėlė šiai transporto sistemai naujus iššūkius. Laivyba yra pagrindinė tarptautinės prekybos transporto priemonė. Jūra gabenama iki 80 % visos tarptautinės prekybos prekių ir krovinių, tai sudaro apie 70 proc. visų krovinių vertės. Europos komisija nurodo, kad beveik 90 % ES išorinės ir 40 % vidinės prekybos vyksta jūrų transportu.

Laivams XX amžiuje buvo būdinga dedveito, tonažo ir laivo greičio didėjimo tendencija. Ypač tanklaivių, konteinervežių ir sausakrūvių. Tai savo ruožtu didino ir galingų dyzelinių variklių kūrimo ir įdiegimo poreikį. XX a. viduryje galingiausio dyzelinio variklio galia neviršijo 15 000 kW. Dėl šios priežasties į didelio tonažo laivus buvo montuojamos garo turbinos, nors jų naudingo veikimo koeficientas (toliau – n. v. k.) neviršijo 0,32, o to laikotarpio dyzelinių variklių n. v. k buvo 0,45 (Woodyard, D. 2009). Šiuolaikiniai dyzeliniai varikliai, atlikus konstrukcijos pakeitimus ir pritaikius pažangias technologijas, išvysto 80 000 kW, o jų n. v. k. yra didesnis nei 0,5. Jei 1970–1990 metais variklio galia įprastai buvo didinama didinant variklio parametrus (cilindro skersmuo siekė iki 106 cm), tai šiuolaikiniuose varikliuose – priešinga tendencija: parametrai mažinami, o galingumas didinamas didinant oro pripūtimą (Возницкий, И. В., Пунда, А. С., 2010). Didinant oro pripūtimą didėja variklio darbo ciklo maksimalus slėgis ir mechaninės apkrovos. Siekiant išvengti neigiamų pasekmių gamintojai iš esmės pakeitė ciklo parametrus. Tokiuose varikliuose suslėgimo slėgis nuo maksimalaus degimo slėgio skiriasi 5–10 % (Kuiken, K., 2008). Didinant dyzelinių variklių galią, gamintojai susidūrė su azoto oksidų emisijos problema. Didinant pripūtimo slėgį, viena vertus, gaunamas teigiamas efektas – didėja maksimalus degimo slėgis, variklio galia ir variklio ekonomiškumas, tačiau, kita vertus, yra ir neigiamų pasekmių – didėja ir teršalų iš laivo kiekis, t. y. azoto oksidų (NO<sub>x</sub>). Tai privertė gamintojus mažinti NO<sub>x</sub> emisijas variklio galios ir ekonomiškumo sąskaita. Buvo sukurtos elektroninės variklio veikimo valdymo sistemos ir degalų sistemos, kurios sudarė galimybę keisti degalų įpurškimo dėsnį, atsižvelgiant į variklio darbo režimą. Šių sistemų įdiegimas variklyje HYUNDAI MAN B&W S50ME-B9 optimizavo variklio darbą galios ir ekonomiškumo atžvilgiu bei sumažino NO<sub>x</sub> emisijas įvairiuose variklio darbo režimuose.

**Tyrimo objektas** – pažangių variklio valdymo ir degalų sistemų, įdiegtų į naujos kartos dvitaktį, mažų apsukų laivų vidaus degimo variklį HYUNDAI MAN B&W S50ME-B9, poveikis variklio parametrams.

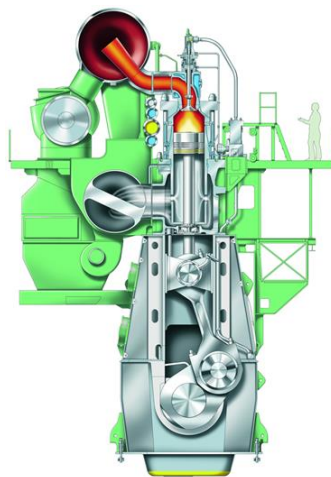
**Tyrimo tikslas** – įvertinti variklio valdymo ir degalų sistemų, įdiegtų į naujos kartos dvitaktį, mažų apsukų laivų vidaus degimo variklį HYUNDAI MAN B&W S50ME-B9, poveikį variklio ekonominiams ir emisijos parametrams, siekiant atitikties aplinkosaugos reikalavimams.

**Pagrindinis tyrimo metodas** – tai mokslinės ir praktinės literatūros analizė. Taip pat taikomi interpretacijos, grafiniai, sintezės ir kiti metodai.

Šis tyrimas pagrindžia integruotų šiuolaikinių technologijų MAN B&W varikliams pranašumus ir skirtumus, lyginant pagrindinio variklio su elektronine veikimo valdymo sistema E tipo (ME-C) variklius su ankstesnės kartos, pagrindinio variklio su kumšteline paskirstymo velenu C tipo (MC-C) varikliais, išskiria naujos kartos variklių valdymo, pasitelkiant elektronines valdymo sistemas, efektyvumą ir atitikimą aplinkosaugos reikalavimams.

### ME-C TIPO VARIKLIAI IR JŲ YPATUMAI

Šiame darbe analizuojamas variklis – tai dvitaktis mažų apsukų variklis HYUNDAI MAN B&W S50ME-B9 (1 pav.).



**1 pav.** Variklis HYUNDAI MAN B&W S50ME  
*Fig. 1.* The engine HYUNDAI MAN B&W S50ME  
Šaltinis: MAN Diesel & Turbo, 2014.

Šiame variklyje gamintojas įdiegė esminius konstrukcijos pakeitimus, jais pasinaudojus buvo gauti šie rezultatai (MAN Diesel & Turbo, 2014):

- sumažinta variklio emisija 12 % ( $\text{NO}_x$  lyginant su ankstesniu MC-C tipo varikliu sumažėjo 12 %);
- padidinta variklio galia 5,5 % palyginus su prototipu;
- padidintas variklio ekonomiškumas - apie 15 %;
- padidintas variklio patikimumas - elektroninių kontrolės sistemų panaudojimas padėjo aptikti ir pašalinti galimų gedimų priežastis;
- padidintas variklio naudojimo laikas šio tipo variklių tarnavimo laikas pailgėjo tris kartus;

Variklio konstrukcijos pakeitimai sudarė galimybę įgyvendinti reikšmingus variklio veikimo pokyčius (MAN Diesel & Turbo, 2014).

Įdiegus elektronines valdymo sistemas, buvo visiškai kompiuterizuotas variklio valdymas. Tai sudarė galimybę atsisakyti kumštelinio paskirstymo veleno – variklyje buvo panaikinta tiesioginė vožtuvų bei degalų siurblių veikimo priklausomybė nuo alkūninio veleno. Variklio veikimas tapo lanksčiau valdomu ir efektyvesniu.

Elektroninės variklio valdymo sistemos sudarė galimybę keisti variklio veikimo režimus ir optimizuoti variklio veikimo parametrus ne tik nominaliu variklio veikimo režimu, bet ir esant daliai apkrovai. Tai aktualu, nes varikliui veikiant daliai apkrova, variklio efektyvumas mažėja, suprastėja degalų degimo proceso kokybė, nes pilnai nesudega degalai ir tai didina variklio dūmingumą.

Galimybė pakeisti įpurškimo dėsnį, atsižvelgiant į variklio darbo sąlygas, sudarė sąlygas keisti ir variklio veikimo režimą. Mažinant išankstinį degalų įpurškimo kampą, sumažinamas maksimalus degimo slėgis ( $p_z$ ), todėl mažėja  $\text{NO}_x$ . Kita vertus, mažėja ir variklio galia bei ekonomiškumas (McGeorge, 2011).

Variklyje HYUNDAI MAN B&W S50ME-B9 kiekvieno cilindro galvoje yra sumontuoti trys degalų purkštuvai, todėl ciklinis degalų įpurškimas gali būti atliktas ir viena porcija, ir per keletą kartų. Remiantis variklių gamintojo bandymų rezultatais, galima teigti, kad esant kuo didesniai įpurškiamų degalų kiekiui įpurškimo pradžioje, tuo didesnė ciklo  $p_z$  reikšmė, o įpurškiant ciklinį degalų kiekį per kelis kartus  $p_z$  reikšmė yra sumažinama.

Tobulėjant technologijoms ir griežtėjant aplinkosauginiams reikalavimams, variklių gamintojai, siekdami didinti konkurencingumą, investuoja į naujų technologijų kūrimą ir pritaikymą.

ME-C tipo varikliai buvo suprojektuoti užtikrinant šiuos procesus (Senčila, 2011):

- degalų padavimo laiko ir kiekio kontrolę;
- išmetimo vožtuvo kontrolę;
- cilindrų alyvos reikiamo kiekio padavimą.

ME-C variklių privalumai (MAN Diesel & Turbo, 2014):

- degalų optimizavimas skirtingiems darbo režimams bei dirbant skirtingomis apkrovomis;
- sumažintos cilindrų tepimo alyvos sąnaudos;
- didesnis variklio efektyvumas dirbant skirtingomis apkrovomis.

Pagrindinė ME-C variklio pagaminimo priežastis – tai galimybė pilnai kontroliuoti variklio oro vožtuvus, užvedimo - reversavimo sekas, pagalbinių prapūtimo mechanizmų darbo režimus, degalų įpurškimą, išmetimo vožtuvo atidarymo / uždarymo kampus bei cilindro alyvos padavimą.

Variklių ME-C ir MC-C parametrai pateikiami Lentelėje.

Lentelė MAN B&W MC ir ME variklių techninių duomenų palyginimas

Table. Comparison of of MAN B&W MC and ME engine data

Variklio modelis	D, mm	S, mm	Cilindro tūris, l	Didžiausias apsisukimų skaičius, aps./min		N <sub>e</sub> , kW
				Mažiausias	Didžiausias	
S50MC-C (4-9 cil.)	500	2000	393	95	127	6320 -14220
S50ME-C (4-9 cil.)	500	2000	393	108	127	6640-14940

Šaltinis: sudaryta autoriaus

Lyginant su pirmtaku (1 lentelė), MC–C tipo varikliu, degalų įpurškimas ir išmetamųjų vožtuvų veikimas priklauso nuo kumštelinio paskirstymo veleno, o ME–C tipo variklis nuo kompiuterio programos. Kadangi mechaninis velenas reikalauja atidesnio aptarnavimo eksploatuojant, taip pat nepaisant kitų papildomų mechanizmų, laiko kontrolės galimybės yra ribotos naudojant kumštelinius paskirstymo velenus. MC–C tipo varikliai turi standų ryšį tarp alkūninio veleno, paskirstymo veleno, išmetimo vožtuvų ir aukšto slėgio degalų siurblių. Taigi įdiegiant elektroninę variklio valdymo sistemą siekiama pagrindinio tikslo – užtikrinti degalų įpurškimo trukmę ir kiekį bei išmetimo vožtuvų valdymą pagal optimizuotą kompiuteriu algoritimą.

Konstrukcijos požiūriu pagrindiniai skirtumai tarp MC–C ir ME–C tipo variklių yra šie (Возницкий, Пунда, 2011):

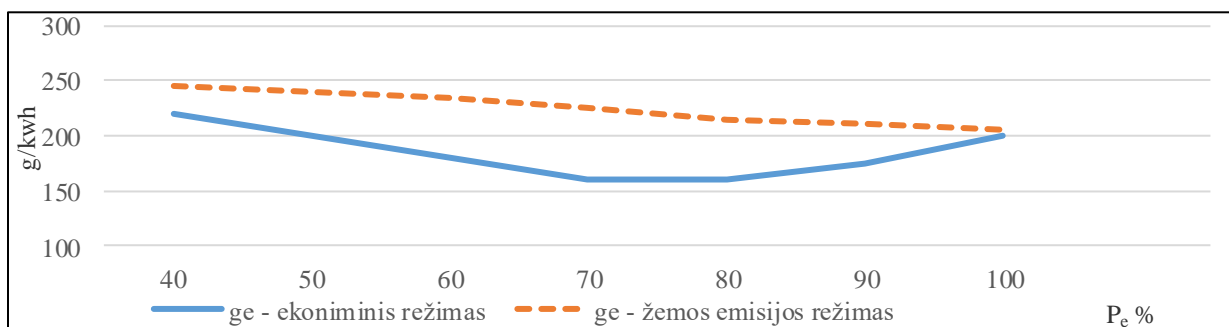
1. Grandininę pavarą, sukusią paskirstymo veleną su vožtuvų pavaramis, pakeitė hidraulinis galios maitinimo blokas su aukšto slėgio siurbliais (iki 250 bar);
2. Degalų siurblius ir išmetimo vožtuvų pavarą pakeitė hidraulinis cilindro vienetas;
3. Mechaninį cilindrines alyvos lubrikatorių pakeitė elektroninis „Alfa“ lubrikatorius;
4. Įdiegta alkūninio veleno pozicijos jutimo sistema;

5. Įdiegta variklio valdymo sistema, kuri kontroliuoja šių įrenginių veikimą:
- elektroninių purkštuvų;
  - išmetimo vožtuvo;
  - degalų slėgio stiprintuvo;
  - pagalbinių oro pripūtiklių;
  - paleidimo ir reversavimo seką.

## VARIKLIO HYUNDAI MAN B&W S50ME-B9 EMISIJOS MAŽINIMO BŪDAI

Nuolat griežtėjantys aplinkosaugos reikalavimai įpareigoja variklių gamintojus pašalinti variklių dūmingumą ir sumažinti  $\text{NO}_x$  kiekį išmetamosiose dujose. Variklių dūmingumas stebimas dalinėse apkrovose, nes dirbant varikliui šiose apkrovose suprastėja kuro degimo procesas, taip pat cilindro pripildymas šviežiu oru.

Analizuojant gamintojo MAN B&W pateiktas specifinio degalų suvartojimo reikšmes, lyginant ekonominį režimą su žemos  $\text{NO}_x$  emisijos režimu (2 pav.), nustatyta, kad esant mažesniai specifinio kuro suvartojimui didėja  $\text{NO}_x$  kiekis. Tai reiškia, kad variklio režimas, kai suvartojamas mažesnis kuro kiekis yra ekonomiškė, bet didesnis  $\text{NO}_x$ .

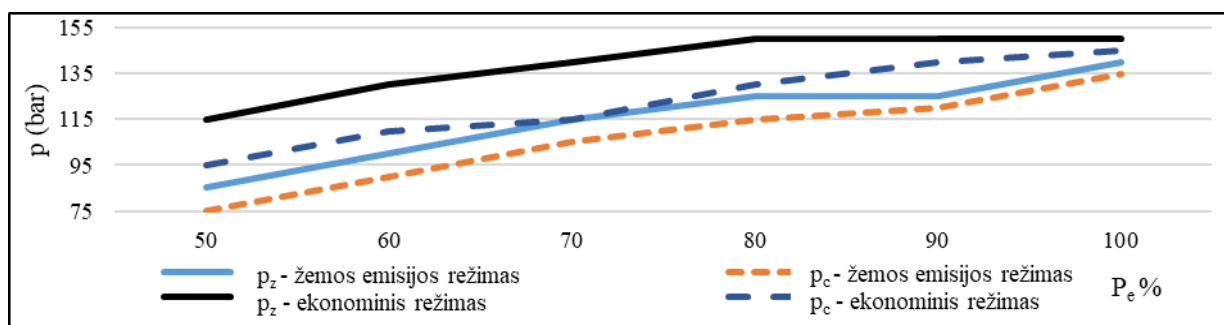


2 pav. Specifinis kuro suvartojimas lyginant ekonominį režimą su žemos  $\text{NO}_x$  emisijos režimu

Fig. 2. Specific fuel consumption by comparing economic mode with low  $\text{NO}_x$  emission mode

Šaltinis: MAN Diesel & Turbo, 2014.

Didėjant variklio ekonomiškumui didėja  $p_z$  ir  $p_c$  (3 pav.). Keisti ciklo suslėgimo slėgį ir maksimalų degimo slėgį variklyje MAN B&W S50ME-B9 galima keičiant išmetimo vožtuvo atidarymo ir uždarymo laiką, arba keičiant išankstinį kuro įpurškimo kampą, arba keičiant kuro įpurškimo dėsnį. Dėl šių priežasčių į ME-C variklio kontrolės sistemą įtraukti du režimai: „ekonominis režimas“ ir „žemos  $\text{NO}_x$  emisijos režimas“.

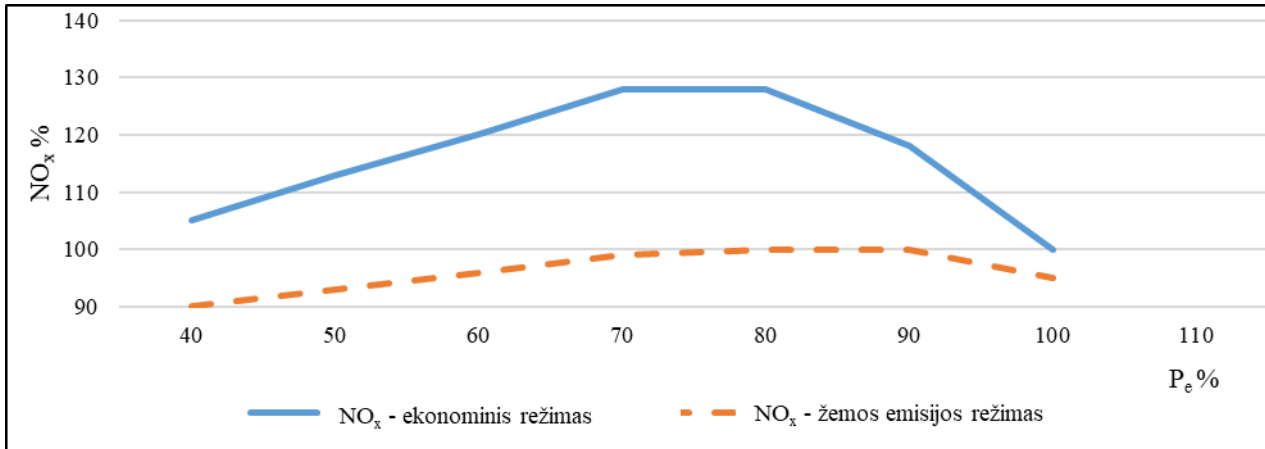


3 pav. Suslėgimo slėgio ir maksimalaus degimo slėgio kreivės lyginant ekonominį režimą su žemos  $\text{NO}_x$  emisijos režimu

Fig. 3. Compression pressure and maximum burning pressure curves comparing economic mode with low  $\text{NO}_x$  emission mode

Šaltinis: MAN Diesel & Turbo, 2014.

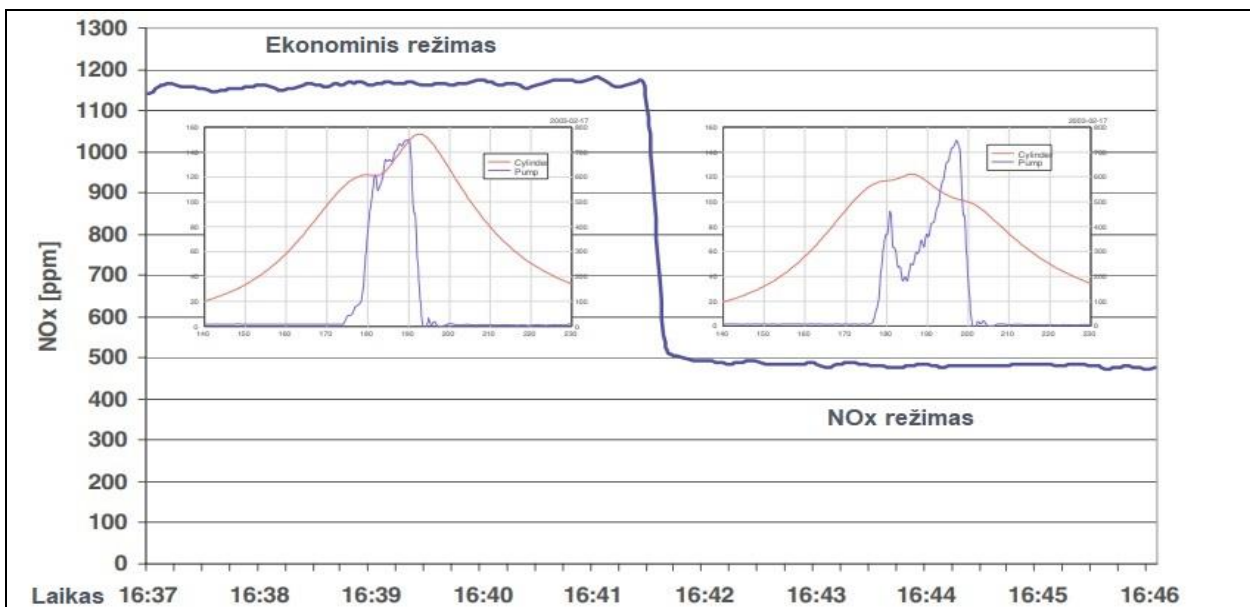
Emisijos kaitos ir variklio apkrovos režimo sąsaja pateikia 4 pav. Varikliui veikiant 100 % apkrova skirtumas tarp azoto emisijos kiekio praktiškai nesiskiria, bet režimuose nuo 70 % iki 80 % emisijos skirtumas siekia daugiausiai 27 %.



4 pav. Azoto oksidų emisijos kreivės lyginant ekonominį režimą su žemos NO<sub>x</sub> emisijos režimu  
 Fig. 4. Nitrogen oxide emission curves comparing economic mode with low NO<sub>x</sub> emission mode  
 Šaltinis: MAN Diesel & Turbo, 2014.

Siekiant sumažinti variklio emisiją, taikomos šios priemonės:

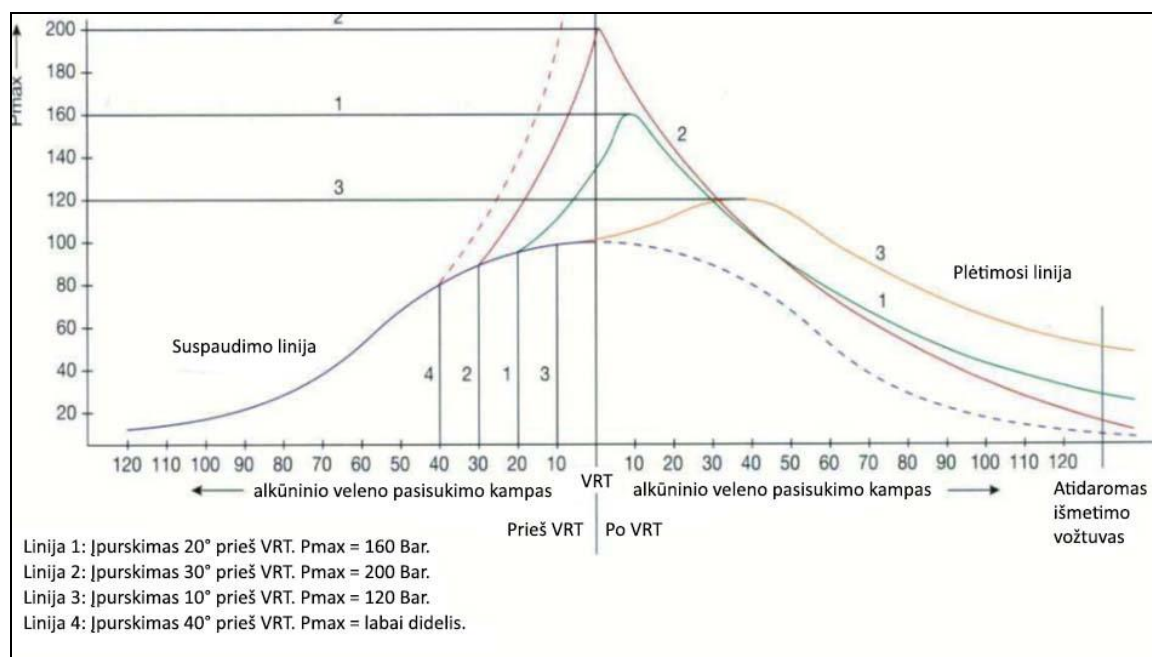
1. Dvigubo įpurškimo dėsnis (5 pav.). Mažinamas degalų kiekis įpurškimo pradžioje, o dalis degalų įpurškiama plėtimosi linijoje. Iš indikatorinių diagramų matome, kad maksimalaus degimo slėgio dydis priklauso nuo degalų kiekio, įpurškiamo ciklo pradžioje. Todėl variklio  $p_z$  ir  $p_c$  galima keisti įpurškiant mažesnę degalų kiekį įpurškimo pradžioje, o likusią dalį įpurškiant jau vykstant degimui. Vėlesnis dalinis degalų įpurškimas sumažina maksimalų degimo slėgį ir temperatūrą, sumažina variklio emisiją, tačiau padidina specifinį degalų suvartojimą ir turi įtakos variklio ekonomiškumo sumažėjimui.



5 pav. Maksimalaus degimo slėgio ir emisijos priklausomybė nuo įpurškimo dėsnio  
 Fig. 5. Maximum combustion pressure and emission dependence on the law of injection  
 Šaltinis: Kuiken, 2008.

2. Dūmingumas dalinėse apkrovose eliminuojamas pagerinus oro tiekimą į variklį (padidintas turbokompresorių naudingo veikimo koeficientas dalinėse apkrovose, papildomų pripūtimo mechanizmų panaudojimas). Varikliuose S50ME-B9 papildomai sumontuoti mechaniniai oro pripūtikliai su elektros pavara. Šie pripūtikliai automatiškai įsijungia tada, kada variklis dirba dalinėse apkrovose ir pagerina oro tiekimą į cilindrą. Tai pagerina degalų sudegimą ir pašalina dūmingumą mažose apkrovose.

3. Mažinamas išankstinis degalų įpurškimo kampas,  $p_z$  ir  $p_c$  kaita priklausomai nuo išankstinio degalų įpurškimo kampo pavaizduota 6 pav. Jei išankstinis degalų įpurškimas yra 40 alkūninio veleno apsisukimo laipsnių, tai maksimalus degimo slėgis yra ekstremalus ir tokiu režimu variklis dirbti negali. Sumažinus išankstinį degalų įpurškimo kampą iki 30 laipsnių maksimalus degimo slėgis siekia 200 barų. Varikliui dirbant tokiu režimu variklis patirtų aukštas slėgio ir temperatūrinės apkrovas, tai sutrumpintų jo tarnavimo laiką. Sumažinus įpurškimo kampą dar 10 laipsnių maksimalus degimo slėgis sumažėja iki 160 barų. Esant 10 laipsnių išankstinio degalų įpurškimo kampui, maksimalus degimo slėgis sumažėja iki 120 barų, ir jis nuo suslėgimo slėgio skiriasi tik 20 barų. Tačiau mažinant išankstinį degalų įpurškimo kampą degimas tęsiasi plėtimosi linijoje. Degant kurui plėtimosi linijoje nesudegusios kuro dalelės baigia degti, todėl veikiant varikliui pagal plėtimosi linijas 3 ir 1, emisija yra minimali, bet variklio ekonomiškumas mažėja. Toks variklio režimas atitinka „žemos emisijos režimą“.



6 pav. Maksimalaus degimo slėgio priklausomybė nuo išankstinio kuro įpurškimo kampo

Fig. 6. Dependence of maximum combustion pressure on pre-fuel injection angle

Šaltinis: Kuiken, 2008.

4. Selektivos katalitinės redukcijos (SCR) įrangos naudojimas.  $\text{NO}_x$  kenksmingumo šalinimo selektivos katalitinės redukcijos kameroje, kurioje  $\text{NO}_x$  reaguoja su amoniaku esant 300–400 °C temperatūrai, susiskaido į azotą ir vandenį.

5. Išmetamųjų dujų recirkuliacinės (EGR) sistemos panaudojimas.

6. Variklio tarša dirbant visais režimais atitinka MARPOL konvencijos VI priedo reikalavimus dėl taršos azoto oksidais.

Išanalizavus ir palyginus naujos kartos ME-C tipo variklį su ankstesnės kartos varikliu MC-C išryškėjo naujos kartos variklio ME-C pranašumai:

- mažesnis specifinis degalų sunaudojimas ir geresni eksploatacinių rodiklių degalų įpurškimo ir išmetimo vožtuvų kintamo laiko elektroninio valdymo dėka dirbant bet kokiomis apkrovomis;
- tinkamas kuro įpurškimo slėgis ir rodiklių formavimas dirbant bet kokiomis apkrovomis;
- pagerintos išmetimo charakteristikos su žemesniu  $\text{NO}_x$  ir bedūmiu darbu;
- lengvas darbo režimų pakeitimas eksploatacinių metu;
- mechaninių sistemų paprastumas su gerai pasitvirtinusia tradicine kuro įpurškimo technologija;
- valdymo sistema su tikslesniu laiku, duodanti geresnį variklio balansą ir išlygintą terminę apkrovą cilindrių viduje ir tarp cilindrių;

- sistematizuotas darbas, adekvatus stebėjimas ir ilgalaikė variklių diagnostika tarp revizijų;
- galimos žemesnės apskukos manevro metu;
- geresnė akceleracija judant į priekį ir avarinio sustojimo metu;
- integruoti *Alfa* cilindriniai lubrikatoriai;
- atnaujinama programinė įranga visam variklio darbo laikotarpiui.

### Išvados

1. Atsisakius tradicinio paskirstymo veleno ir automatizavus procesą, galima lanksčiai koreguoti variklio rodiklius, varikliui veikiant skirtingomis apkrovomis, keičiant degalų įpurškimo laiką ir įpurškiamą degalų kiekį (porciją) bei išmetimo vožtuvo uždarymo ir atidarymo laiką.
2. Automatizavus ME-C tipo variklį galima rinktis tarp ekonominio arba ekologinio darbo režimo.
3. Kompiuteriu valdomi, be paskirstymo veleno, mažų apskukų MAN B&W ME-C dyzeliniai varikliai yra dyzelinių variklių technologijos inovacija, kurią taikant galima ateityje pagerinti variklio ekonomiškumą ir ekologiškumą bei supaprastinti eksploatavimą.

### Literatūra

1. Kuiken, K. *Diesel engines I,II for ship propulsion and power plants from 0 to 100,000 kW*. Onnen, 2008.
2. MAN Diesel & Turbo. MAN B&W MC/MCC, ME/MEC/ME-B/GI engines. Copenhagen. Prieiga internete: [https://marine.man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/epub/S50 ME-B9\\_3.pdf](https://marine.man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/epub/S50 ME-B9_3.pdf), 2014.
3. McGeorge, H. D. *General Engineering Knowledge*, London and New York, 2011.
4. Senčila, V. (red.) *Mokomoji knyga vadovaujančio lygmens laivų mechanikams*. Klaipėda, 2011.
5. Woodyard, D. *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines*. Burlington, 2009.
6. Возницкий, И.В., Пунда, А.С. *Судовые двигатели внутреннего сгорания*. Санкт Петербург, 2010.

## Essential Changes in the Engine Hyundai Man B&W S50ME-B9 Construction and their Effect on the Basic Engine Parameters

(Received in January, 2019; Accepted in April, 2019; Available Online from 10th of May, 2019)

### Summary

The rapid development of technology in the last 20 years has led the industry to adapt to the market, and manufacturers have increasingly adopted innovative solutions. The maritime industry is no exception. There have been radical changes in the construction of marine engines, due to the following reasons: increase of the engine power; increasing of the engine economy; simplification of operation and increasing time between overhauls; reduction of emissions. The root cause of the engine development is the necessity of powerful engines with increasing tonnage and tightening environmental requirements. The research object is the new generation of two-stroke, low-speed internal combustion engine HYUNDAI MAN B&W S50ME-B9 and other technologies installed in the engine. The purpose of the research is to analyze the two-stroke diesel engine HYUNDAI MAN B&W S50ME-B9 with its parameters, and the advanced technology which has been installed in the engine to evaluate its impact on the engine parameters and the compliance with environmental requirements. At the end of the study it has been determined that after the removal of the camshaft, thanks to automation, it is possible to flexibly adjust the engine parameters when working with different loads, changing the fuel injection time, the portion, and the exhaust valve's chronometry. By automating the ME-C engine, it is possible to choose between economical or ecological operating modes. MARPOL Annex VI requirement for emissions of nitrogen oxides can be easily achieved using secondary NOx emission reduction method. Computer controlled, low-speed MAN B&W ME-C diesel engine is the future of diesel engine technology, and continued application of new systems will improve not only economy and ecology, but also simplify the operation of engine.