

MAN B&W ME-GI dvogorivni dizelski motor

MAN B&W ME-GI Dual Fuel Diesel Engine

Maro Jelić

Pomorski odjel
Sveučilište u Dubrovniku
e-mail: mjelic@unidu.hr

Damir Mage

Diplomant diplomskog studija Pomorstvo
Sveučilište u Dubrovniku
e-mail: damir.mage@gmail.com

UDK 621.436

Stručni članak / Professional paper

Rukopis primljen / Paper accepted: 27. 2. 2013.

Sažetak

U ovom radu opisuju se dvogorivni dvotaktni dizelski motori ME-GI, razvijeni od tvrtke MAN B&W koji se koriste prirodnim plinom kao gorivom. Kao lider među dvotaktnim dizelskih motorima, tvrtka MAN B&W razvija učinkovitu propulziju s niskim vrijednostima emisije ispušnih plinova i pridonosi poboljšanju dizajna indeksa energetske učinkovitosti (EEDI - Energy Efficiency Design Index).

Novi zahtjevi za smanjivanjem emisije ispuštanja i povećanjem troškova goriva vode k tome da pomorska industrija traži nova alternativna rješenja, pa se prirodni plin smatra važnim i čistim izvorom energije za pokretanje brodova. Korištenjem prirodnog plina kao goriva, znatno se smanjuje količina ispuštenog ugljičnog dioksida.

Koncept ME-GI sustava temelji se na ubrizgavanju plina pod visokim tlakom, sa zapaljenjem pilot dizelskog goriva. Na ovom principu rada dobivena toplinska učinkovitost od plina jednaka je toplini dobivenoj od teškog goriva. Kod koncepta ME-GI motora glavni naglasak je stavljen na sustav dobave plinom, od LNG tanka do visokotlačnog kompresora plina i dalje do motora.

Summary

This paper describes the ME-GI type dual fuel two stroke diesel engine developed by MAN B&W, which uses natural gas as fuel. MAN Diesel & Turbo company is the leading manufacturer of marine two stroke diesel engines and develops an efficient propulsion with low emission levels and improved energy efficiency design index – EEDI.

Maritime industry is introducing alternative solutions for ship propulsion, due to new regulations demands for further decrease of emission levels and higher fuel costs, and natural gas is considered as very important and environmentally friendly ship propulsion fuel. Very low emission level is achieved by using natural gas as ship's fuel.

ME-GI concept is based on very high pressure gas injection into engine cylinder. In this solution diesel fuel is used in small portions as a pilot fuel to start combustion process in the cylinder. In the mentioned concept the heat efficiency obtained from natural gas as propulsion fuel is equal to heat efficiency obtained from heavy fuel oil.

The main issue in ME-GI dual fuel diesel engine, described in this paper, is natural gas fuel supply system, from LNG storage tank to high pressure supply compressors and to propulsion engine.

UVOD / Introduction

Već dugi niz godina traga se za najučinkovitijim rješenjima koja će omogućiti djelotvornu opskrbu i racionalnu uporabu energije. Zahtjevi za što manjim utjecajem na okoliš, spoznaja o sve siromašnijim izvorima energije, energetske krize i sve viša cijena energenata bitno su utjecali na razvoj energetske učinkovitijih tehnologija.

Jedna od energetske učinkovitih i ekološki prihvatljivih tehnologija je i razvoj dvogorivnih (dual fuel) brodskih dizelskih motora.

Danas je četverotaktni dvogorivni dizelski motor uveden na tržište LNG brodova kao dio propulzijskog dizel-električnog sustava, ali i elektronski kontrolirani dvotaktni ME-C dizelski motori uspješno su uvedeni u ovom tržišnom segmentu, nudeći visoku učinkovitost sustava. Visoki tlak, ubrizgavanje plina kod dvotaktnog dvogorivnog dizelskog motora u kombinaciji s

visokom učinkovitošću sustava nudi značajno smanjenje emisije štetnih sastojaka u ispušnim plinovima za LNG brodove.

Tvrtka MAN B&W u ovom je segmentu nastavio razvoj i istraživanje iz kojeg je nastao ME-GI koncept s ubrizgavanjem plina pod visokim tlakom kod elektronički upravljanih dvotaktnih dizelskih motora.

Veća termodinamička učinkovitost dizelskih motora u odnosu prema tradicionalnoj parnoj turbini rezultira sve većim korištenjem dvogorivnih dizelskih motora kao glavnog porivnog stroja kod LNG prijevoznika. Na tržištu su se pojavila dva rješenja:

- sporohodni dvotaktni dvogorivni dizelski motor i
- srednjehodni četverotaktni dvogorivni dizelski motor s elektro-propulzijom.

U ovom radu, opisan je rad dvotaktnog ME-GI elektronski

KLJUČNE RIJEČI

**dvogorivni dizel motor
ubrizgavanje plina
emisija štetnih plinova
energetska učinkovitost**

KEY WORDS

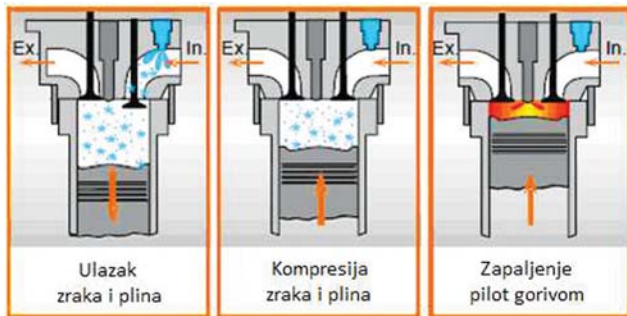
**Dual Fuel Diesel Engine
Gas Injection
Emissions
Energy Efficiency**

upravljanog koncepta na dizelsko i LNG / CNG gorivo, kao i glavne komponente sustava i dobiveni rezultati.

Elektronski kontroliran ME-GI motor pokazuje značajnu prednost u optimizaciji procesa izgaranja i veliki korak u učinkovitosti i poboljšanju emisije. Osim sigurnog i pouzdanog rada na plin, ME-GI nudi znatno smanjenu emisiju ispuštanja ugljika i NO_x u usporedbi sa standardnim ME motorima na konvencionalno dizelsko gorivo.

KONCEPT I KARAKTERISTIKE ME-GI DVOGORIVNOG DIZELSKOG MOTORA / *Concept and characteristics of ME-GI dual fuel diesel engine*

Temelj rada zasniva se na ubrizgavanju plina (LNG-metan) pod visokim tlakom i sa zapaljenjem pilot dizelskog goriva. Kao pilot dizelsko gorivo može se koristiti teško dizelsko gorivo (HFO) ili lako dizelsko gorivo (MDO). Bitno je naglasiti da dvogorivni dizelski motor može biti u normalno radnom režimu koristeći kao gorivo plin (LNG) s minimalnim udjelom dizelskog goriva kao pilot goriva ili koristeći teško dizelsko gorivo (HFO) /lako dizelsko gorivo(MDO) kao alternativno gorivo.



Slika 1. Temelj rada dvogorivnog dizelskog motora
Figure 1 Working principles of dual fuel diesel engine

Karakteristike dvogorivnog dizelskog motora su visoka učinkovitost u odnosu prema parnoj turbini, manja emisija štetnih sastojaka u ispušnim plinovima i gorivna fleksibilnost (korištenje plinskog goriva ili dizelskog goriva).

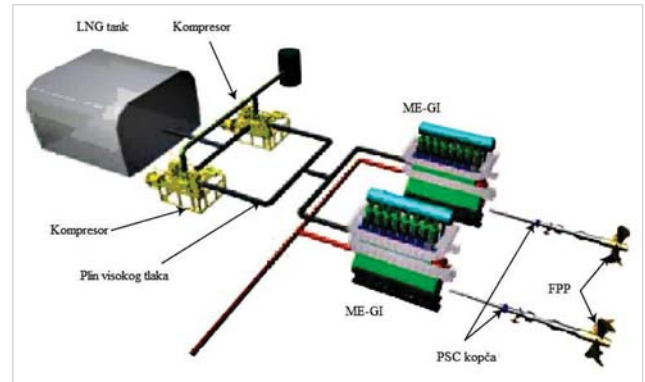
Za vrijeme rada motora na plinsko gorivo omogućena je automatska promjena rada na dizelsko gorivo u slučaju hitnih situacija bez gubitaka snage motora i brzine broda. Također je moguća i automatska promjena na dizelsko gorivo u bilo kojem trenutku i pri bilo kojem opterećenju motora bez utjecaja na performanse motora. Automatska promjena goriva s plinskog na dizelsko događa se i nakon tri minute rada motora na opterećenju manjem od 15%.

Najveći doprinos dvogorivnih dizelskih motora je u području emisije štetnih sastojaka u ispušnim plinovima. Pri radu s plinskim gorivom (LNG) nema vidljivog dima ispušnih plinova, emisija CO₂ smanjuje se od 25% do 30%, emisija NO_x smanjuje se do 80%, potpuno se uklanja emisija SO_x, te se u ispušnim plinovima nalazi vrlo malo neizgorelih čestica.

Sporohodni dvotaktni dizelski motor s visokotlačnim ubrizgavanjem plina, razvijen je u osamdesetim godinama od tvrtke MAN B&W i bio je mehanički kontroliran motor (MC-GI motor). Ovaj motor bio je usmjeren na stacionarne elektrane na tržištu i kao alternativa za parne turbine. Za razliku od MC-GI motora, ME-GI motor je elektronički kontroliran motor, koji uvodi

elektronski nadzor nad ubrizgavanjem goriva, osiguravajući da proces stvaranja smjese, paljenja i izgaranja bude optimiziran.

ME-GI motor je razvijen kao dvogorivni dizelski motor koji je u mogućnosti raditi sa 100% maksimalne kontinuirane snage (*MCR - maximum continuous rating*) i na plinsko i na dizelsko gorivo (HFO, MDO), bez gubljenja učinkovitosti u bilo kojem režimu rada i nudi potpunu gorivnu fleksibilnost brodovlasniku.



Slika 2. ME-GI koncept s dva propulzijska motora
Figure 2 ME-GI concept with two propulsion engines

SUSTAV DOBAVE PLINA / *Gas supply system*

Prilikom uvođenja MAN B&W ME-GI motora na tržište glavni naglasak stavljen je na sustav dobave plinom, od LNG tanka do visokotlačnog kompresora plina i dalje do motora. Suradnja između brodogradilišta, proizvođača kompresora, klasifikacijskog društva i proizvođača motora bila je od velikog značaja da bi se osigurao pravilan i siguran dizajn sustava za dobavu plina.

Najviše pozornosti u pogledu učinkovitosti privlači dvotaktni sporohodni dizelski motor izravno spojen na propeler. Željena snaga porivnog motora može biti generirana jednim motorom spojenim na jedan propeler ili instalacijom dva motora s izravnim pogonom na dva propelera.

Instalacija dva motora je najbolja opcija za LNG brodove kapaciteta 145,000 m³ i više. Klasifikacijska društva ne zahtijevaju zalihost u smislu pogona, ali je zahtijevaju neki operatori na LNG tržištu. Izborom dva ME-GI motora osim zalihosti pogona stvara se i zalihost u smislu dobave goriva. Ako dođe do problema u dobavi plina motor može raditi isključivo na teško dizelsko gorivo.

Različiti čimbenici određuju stopu isparavanja plina, međutim procjenjuje se da dok LNG brod prevozi teret može opskrbiti isparavanjem 80-90% potrebne energije za pogon broda pri punoj snazi, a 40-50% energije dok je u brod u balastu. Puna snaga je definirana kao putovanje pri brzini od 19-21 čvor. Ova brzina je prihvaćena kao optimalna na tržištu LNG-a.

Kompresor plina / *Gas compressor*

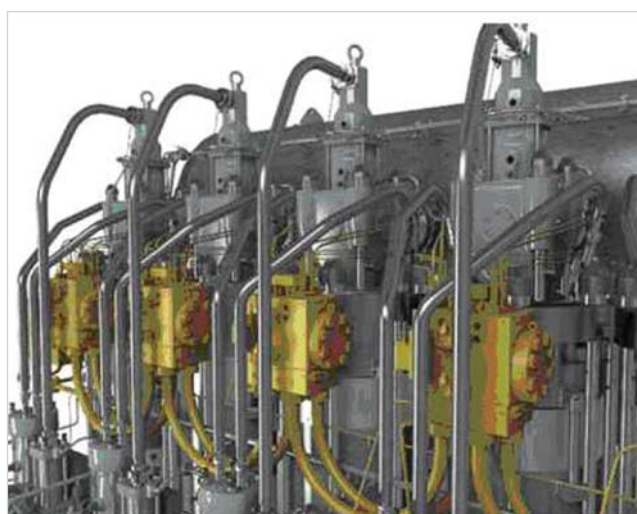
Kako bi se s ME-GI motorom postignula toplinska učinkovitost od 50% tijekom rada na plin, potrebno je povećanje tlaka plina prilikom ubrizgavanja u cilindar na maksimalno 250 bara pri 100% opterećenja. Na nižim opterećenjima potreban tlak linearno se smanjuje do 30% opterećenja motora, gdje je potreban tlak od 150 bara. Zbog navedenog razloga potrebna

je instalacija visokotlačnih kompresora za dobavu plina.

Osnovni dizajn koncepta sustava dobave plina temelji se na dva plinska kompresora. Zalihost kompresora smatra se kao prioritet da se zadovolje zahtjevi klasifikacijskih društava. Svaki kompresor je dizajniran da dobavi ispareni plin u rasponu tlakova od 150 do 265 bara u skladu s opterećenjem motora.

Iznos isparenog plina (BOG – *boiled off gas*), i zato tlak spremnika značajno varira tijekom operativnog ciklusa broda. Koncept dizajna tako zahtijeva da se kompresorima može upravljati uz brojne zahtjevne uvjete:

- širok raspon isparenog plina, putovanje pod teretom i putovanje u balastu,
- razlika u usisnim tlakovima prema tlaku u spremniku,
- vrlo širok raspon usisnih temperatura, topao početak rada i niske temperature u radu i
- različiti sastav plina.



Slika 3. Novi moduli za ubrizgavanje plina
Figure 3 New modules for gas injection

Zbog toga je kompresor opremljen sustavom kontrole kako bi se osigurala dobava plina na potrebnom tlaku ME-GI motoru a tlak unutar spremnika strogo je definiran u određenim granicama. Kompresori su također dizajnirani da pouzdano dobavljaju prirodno ispareni plin kao i onaj prisilno isparen za vrijeme putovanja u balastu.

Kompresor plina 6LP250-5S_1 je dizajniran da može dobavljati niskotemperaturni prirodno ili prisilno ispareni plin iz spremnika s ulaznom temperaturom od -160°C , do tlaka ubrizgavanja u rasponu od 150 do 265 bara. Ukupno pet faza kompresije su raspoređene unutar jednog vertikalnog kućišta kompresora pogonjenih klasičnim elektromotorom.

Jedinstvena konstrukcija kompresora omogućuje odabir najboljeg sustava brtvljenja cilindra prema pojedinoj fazi ovisno o radnoj temperaturi i tlaku. Na ovaj način, postiže se vrlo visoka pouzdanost i raspoloživost, s minimalnim održavanjem.

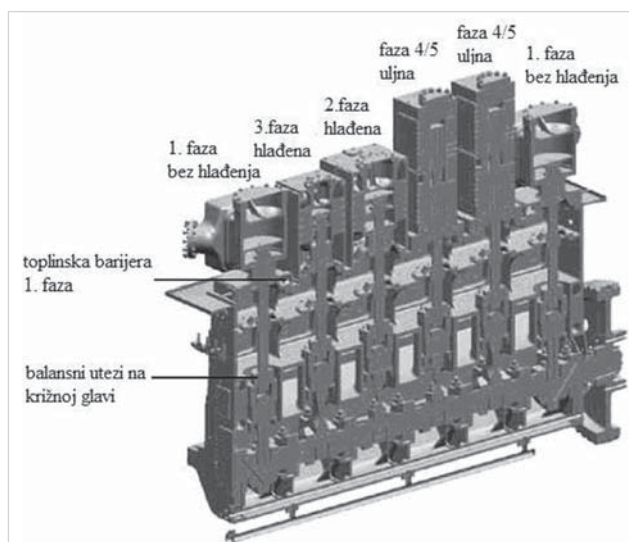
Kompresija bez ulja, potrebna je za vrlo hladnu niskotlačnu fazu od 1 – 3, te se koristi brtvljenje labirintnim sustavom, koji je dobro dokazano tijekom mnogih godina eksploatacije na LNG brodovima i na LNG terminalima. Izbjegavanjem mehaničkog trenja u beskontaktnom labirintu cilindra rezultira iznimno dugim vijekom trajanja komponenti za brtvljenje. U visokotlačnim fazama 4 i 5 koristi se konvencionalna tehnologija

s uljno podmazanim stapnim prstenima.

Kompresor ne može funkcionirati pravilno i pouzdano bez dobro projektiranog i izvedenog vanjskog plinskog sustava. Standardni zahtjevi kojima kompresor mora udovoljiti su definirani statičkom i dinamičkom mehaničkom analizom, toplinskom analizom naprezanja, analizom pulsiranja kompresora i pomoćnog sustava od cijevi za plin, brodskim vibracijama, međuhladnjakom plina, itd..

Kompresor je dizajniran za rad u širokom raspon usisnih temperatura plina od -160°C do $+30^{\circ}\text{C}$ bez posebnih intervencija. Svaka faza kompresora je osigurana s međuhladnjakom za kontrolu ulazne temperature plina u sljedeću fazu. Dizajn međuhladnjaka je konvencionalan, cijevni i pločasti. Prva faza međuhlađenja se zaobilazi ukoliko usisna temperatura padne ispod postavljene granice (oko -80°C).

Mimoilazni (*bypass*) ventili reguliraju protok plina kroz kompresor prema tlaku u cilindru motora unutar definiranih granica sustava. Nepovratni ventili nalaze se na usisnoj strani kompresora gdje sprječavaju povrat plina prema spremniku, između faza 3 i 4 gdje služe za održavanje odgovarajućeg razmaka između bezuljne i uljne kompresije i na završnoj fazi radi osiguranja pražnjenja plina iz kompresora.



Slika 4. Presjek kompresora
Figure 4 Compressor crosssection

Cjevovod za dobavu / Supply pipeline

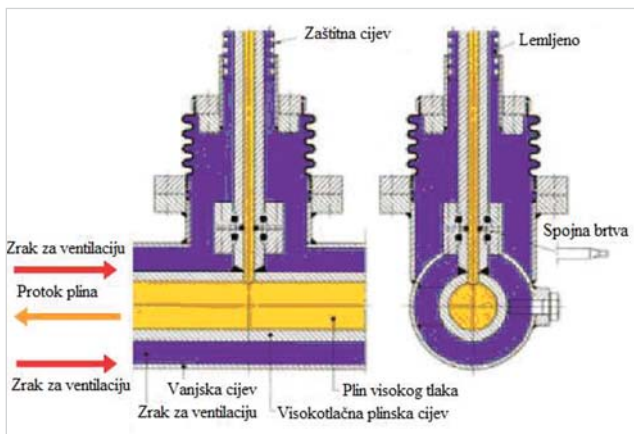
Sustav dobave plina mora biti dizajniran kao sustav zajedničkog voda prema svakom ventilu. Plinske cijevi su dizajnirane kao dvostruki cjevovod, u slučaju puknuća unutarnje cijevi vanjska će spriječiti istjecanje plina u područje postrojenja. Prostor za intervenciju, uključujući i prostor oko ventila, prirubnice, itd., je opremljen s odvojenom ventilacijom s kapacitetom od približno 30 izmjena zraka po satu. Ulazni zrak za ventilaciju uzima se u neopasnom području.

Plinske cijevi su raspoređeni na takav način, (slika 5.), da se zrak usisava u dvostruki cjevovod preko usisnog ventilatora iz atmosfere, gdje dalje prolazi od glavne cijevi do svih ogranka i ponovno natrag u atmosferu. Svi spojevi su povezani s visokotlačnim brtvama a u slučaju propuštanja plina, propušteni plin će se zadržati unutar vanjske cijevi i otkriti uz pomoć senzora za ugljikovodike (HC) instaliranih na izlazu iz ventilacijske cijevi.

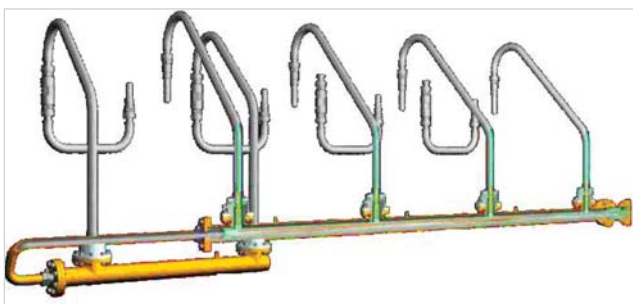
Dvoslojni ventilacijski sustav je također dio plinskog sustava na samom motoru i svi ventili, kao što su ventil za ubrizgavanje plina, su povezani s ovim sustavom.

Kako bi se spriječilo istjecanje plina, koji je pod visokim tlakom, instalirane su brtve i na ventilu za ubrizgavanje plina i na glavnom ventilu za zatvaranje dovoda plina. Zbog više sigurnosti, visokotlačni uljni sustav brtvljenja je uveden kako bi se spriječio ulazak plina u sustav kontrole ulja.

Kada se završava rad motora na plin, plinske cijevi se čiste s inernim plinom, osiguravajući da nema propuštanja plina tijekom rada na HFO / MDO dizelsko gorivo tijekom dužeg vremenskog razdoblja, niti tijekom održavanja i remonta. Plinske cijevi u strojnici su dizajnirane i ispitane na 50% veći tlak nego u normalnom radu, te je sustav cijevi posebno dizajniran kako bi se izbjegle mehaničke vibracije. Ogranak cijevi za pojedine cilindre je dizajniran s odgovarajućom fleksibilnosti da se može nositi s toplinskim širenjem motora od hladnog do toplog stanja. Plinske cijevi su nadalje zaštićene protiv pada teških predmeta u strojnici.



Slika 5. Dvostruki cjevovod
Figure 5 Doublehull pipe



Slika 6. Dvostruki cjevovod
Figure 6 Doublehull pipe

ME-GI sustav ubrizgavanja / ME-GI injection system

Motor MAN B&W ME-GI serije, u smislu performansi motora (snaga, brzina, toplinska učinkovitost, količina ispušnih plinova i temperatura, itd.) je identičan etabliranoj seriji MAN B&W ME motora. Svi ME motori mogu biti ponuđeni kao ME-GI motori, a pošto je ME sustav dobro je poznat, su ovom radu opis dizajna ME-GI motora bavi se samo novim ili modificiranim komponentama motora.

Modifikacija obuhvaća opskrbu plina dvostrukim

cjevovodom, kontrolni blok plinskog ventila s ugrađenim akumulatorom na poklopcu cilindra i ELGI ventil (ventil za kontrolu količine ubrizganog plina). Osim toga, postoje male izmjene na ispušnom sustavu te kontroli i sustavu manevriranja. Osim promjena na navedenim sustavima na samom motoru, potrebno je ugraditi i nove uređaje u pogonskom postrojenju.

Novi uređaji su:

- ventilacijski sustav za ventiliranje prostora između unutarnje i vanjske stijenke dvostrukog cjevovoda,
- sustav brtvljenja ulja koji osigurava brtvljenje ulja za ventile za plin razdvajajući kontrolno ulje i plin,
- sustav inertnog plina koji omogućuje čišćenje plinskog sustava na motoru prilikom prebacivanja pogona s plinskog na dizelsko gorivo,
- dodatni kontrolni i sigurnosni sustav, koji se sastoji od uređaja za mjerenje sadržaja ugljikovodika u zraku u prostoru dvocjevovodnog plinskog voda.

Dodatni kontrolni i sigurnosni sustav ME-GI motora je dizajniran na tzv. "sigurnom stanju", tj. sve nepravilnosti otkrivene tijekom rada u plinskom modu, uključujući i pogrešku samog kontrolnog sustava, rezultirati će zaustavljanjem plina i prebacivanjem rada na dizelsko gorivo. Odmah nakon promjene vrste goriva slijedi ispuhivanje i čišćenje sustava visokotlačnih plinskih cijevi. Promjena u radu s plinskog na dizelsko gorivo uvijek se obavlja bez gubitaka snage na motoru.

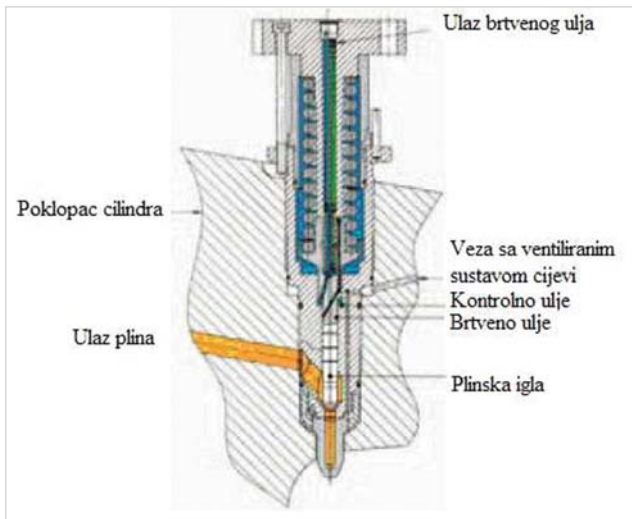
Plin pod visokim tlakom struji iz kompresorske jedinice kroz glavnu cijev i dalje putem sužene i fleksibilne grane cijevi u svaki cilindarski plinski blok. Ove cijevi obavljaju dva važna zadatka i to da razdvajaju svaku cilindarsku jedinicu od ostatka motora u smislu plinske dinamike, te djeluju kao fleksibilna veze između krute glavne cijevi sustava i motora, što umanjuje dodatna naprezanja prouzročena uslijed toplinske ekspanzije dijelova motora.

Akumulator, koji sadrži količinu plina oko 20 puta veću od količine ubrizgavanja po taktu, ima funkciju da unaprijed opskrbljuje pojedini cilindar količinom plina potrebnom za ubrizgavanje uz vrlo blagi pad tlaka plina te je važan dio sigurnosnog sustava.

Budući da je sustav cijevi za dobavu plina dizajniran kao zajednički vod, ventil za ubrizgavanje plina mora se kontrolirati pomoćnim sustavom. To se sastoji od ME hidrauličke kontrole i ELGI ventila, čime se kontrolira vrijeme otvaranja ventila za plin. Rad dvogorivnog motora zahtijeva ventile za ubrizgavanje pilot goriva i plina u komoru za izgaranje. Različite vrste ventila se koriste za ovu svrhu. Dva su ventila za ubrizgavanje plina i dva za pilot goriva. Za rad na dizelsko gorivo i plin potrebno je osigurati:

- dobavu plina pod visokim tlakom,
- dobavu dizelskog goriva (pilot gorivo),
- dobavu kontrolnog ulja za aktiviranje ventila za plin,
- dobavu ulja za brtvljenje.

Dizajn ventila za ubrizgavanje plina prikazan je na slici 7. Plin se dovodi do ventila za ubrizgavanje kroz provrte u poklopcu cilindra. Da bi se spriječilo istjecanje plina između poklopcu cilindra i ventila za ubrizgavanje plina i između kućišta ventila i igle ventila, koriste se brtveni prstenovi koji su napravljeni od materijala otpornog na djelovanje plina i visoke temperature. Svako propuštanje plina kroz prstenove za brtvljenje vodi se kroz provrte u sustav dvostrukog cjevovoda između vanjske i unutarnje stijenke. Ovakvo propuštanje biti će otkriveno HC senzorima.



Slika 7. Ventil za ubrizgavanje plina
Figure 7 Gas injection valve

Plin djeluje kontinuirano na vretenu ventila pri maksimalnom tlaku od oko 250 bara. Da bi se spriječio ulazak plina u sustav kontrolnog ulja za aktiviranje ventila, putem zračnosti oko vretena ventila, vreteno je zabrtvljeno brtvenim uljem čiji je tlak veći od tlaka plina (20 – 50 bara veći tlak).

Ventil za pilot gorivo je standardni ME ventil za dizelsko gorivo bez ikakvih bitnijih konstrukcijskih promjena, osim mlaznice. Tlak dizelskog goriva stalno se prati ME- GI sustavom sigurnosti, kako bi se otkrila bilo kakva nepravilnost na ventilu prilikom ubrizgavanja. Izvedba ventila za pilot dizelsko gorivo omogućava normalnu količinu dobave dizelskog goriva pri radu na isključivo dizelsko gorivo do MCR. Ako se želi prebaciti režim rada motora s plinskog na dizelsko gorivo, u bilo koje vrijeme i sve do 100% opterećenja, to može biti učinjeno bez zaustavljanja motora. Ako će motor raditi dulji period na dizelsko gorivo, preporučuje se promijeniti mlaznice i dobiti povećanje učinkovitosti od približno 1% kada se radi o punom opterećenju motora.

Kao što se može vidjeti na slici 8., ME-GI sustav ubrizgavanja sastoji se od dva ventila za dizelsko gorivo, dva ventila za plinsko gorivo, ELGI ventila za kontrolu ubrizgavanja plinskog goriva i ELFI ventila za kontrolu ubrizgavanja dizelskog goriva. Također se sastoji od pumpe za podizanje tlaka koja opskrbljuje sustav pilot gorivom.

U normalnom radu motora, kada nema neispravnosti na ventilu za dizelsko gorivo, ventil za ubrizgavanje plina se otvara prema kutu koljenaste osovine i ubrizgava se plin. Plin se dobavlja izravno u tijeku izgaranja. Zbog toga se smatra da će količina neizgorenih plinova na kraju biti zanemariva.

Protok plina prema svakom cilindru se kontrolira i svaki pad tlaka biti će automatski otkriven kao i svaki nepravilan protok plina, bilo zbog količine ubrizganog plina ili blokirano ventila plina. U takvoj situaciji dobava plina bit će prekinuta i cjevovod pročišćen inertnim plinom, a motor će se prebaciti na rad s 100%-tnom upotrebom dizelskog goriva bez gubitka snage.

SIGURNOSNA ANALIZA RADA S PLINSKIM GORIVOM / Safety analysis of working with gas fuel

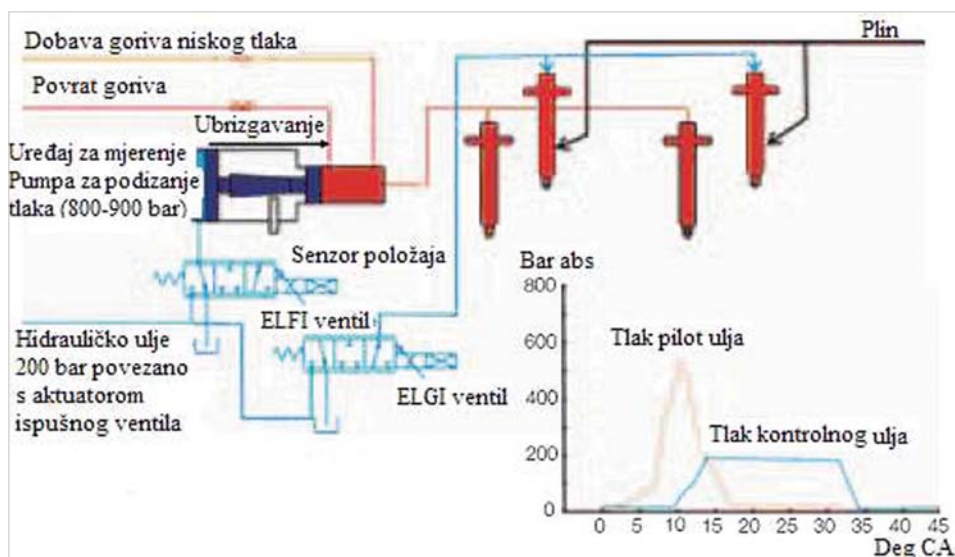
Korištenje plina za pogon dizelskog motor zahtijeva veću pozornost s obzirom na sigurnost rada. Iz tog razloga, ventilirani dvostruki cjevovod je minimalni uvjet za rad motora s plinski gorivom. Osim teoretskih proračuna i analiza, bilo je nužno obaviti i praktična ispitivanja, od kojih su dva bila provedena 1994. godine u elektrani u gradu Chiba s 12K80MC-GI motorom.

Pukotina u cjevovodu / Pipeline fatigue

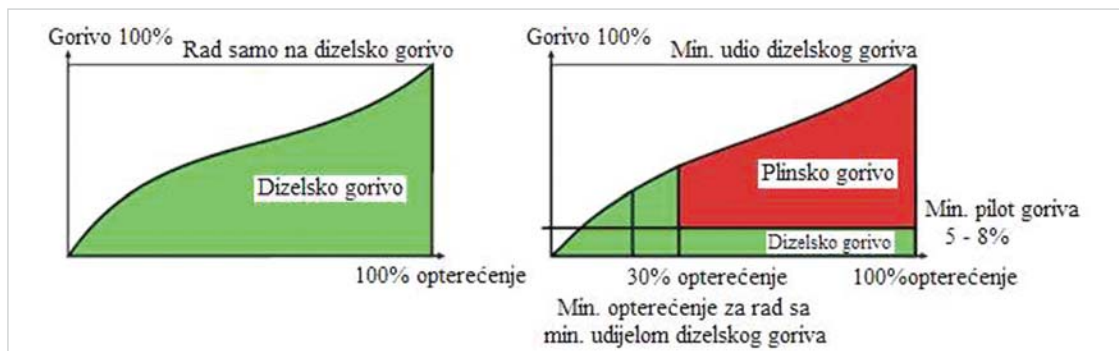
Prvo ispitivanje je izvedeno uvođenjem pukotina u unutarnju cijev da se provjeri hoće li vanjska cijev ostati netaknuta. Ispitivanje nije pokazalo nikakav prodor plina kroz vanjsku cijev, pa se može zaključiti da je koncept dvostrukog cjevovoda ispunio očekivanja.

Fluktacije tlaka plina / Gas pressure fluctuation

Drugo ispitivanje provedeno je na istraživanju fluktuacije tlaka u relativno dugom cjevovodu od visokotlačnog kompresora plina



Slika 8. ME-GI sustav ubrizgavanja
Figure 8 ME-GI injection system



Slika 9. Vrste goriva i opterećenje za ME-GI motor
Figure 9 Fuel types and loads for ME-GI engine

do motora. Za optimalne performanse motora fluktuacije tlaka moraju biti u određenim granicama koje se proračunavaju prema taktu i količini ubrzavanog plina. Sustav cjevovoda dizajniran je na temelju tih proračuna.

Sigurnost strojarnice / Engine room safety

Posljednjo ispitivanje potaknuli su brojni brodar na LNG tržištu zbog same činjenice korištenja plina pod tlakom od 250 bara u strojarnici, gdje posada boravi i radi. Unatoč činjenici da se rizik od punog sloma sustava smatra zanemarivim, MAN B&W proveo je potrebna ispitivanja za slučaj takve nesreće.

Klasifikacijsko društvo Det Norske Veritas (DNV) napravio je simulaciju sigurnosti strojarnice za najgori slučaj (slučaj loma dvostrukog cjevovoda, propuštanja plina pri najvećem tlaku i zapaljenja plina) te studiju posljedica na strojarnicu i posadu. Rad DNV-a sastoji se od CFD (*computational fluid dynamics*) simulacija opasnosti eksplozije i naknadnog požara i istraga o riziku bilo koje situacije kao i razmjere rizika. Kao ulazni podaci za simulaciju uzeti su ključni parametri, volumen strojarnice, položaj glavnih komponenti, količina zraka koji dobivaju ventilatori, položaj cijevi za plin i kontrolna soba.

Realni scenariji istjecanja plina su definirani, uz pretpostavku potpunog loma vanjske cijevi i veće ili manje rupe u unutarnjoj cijevi. Zatvaranje glavnog ventila plina, ventilacijskog sustava i uvjeti ventilacije prije i poslije otkrivanja su uključeni u analizu. Količina plina u cijevi goriva ograničava trajanje curenja. Zapaljenje ispušnog plina koje uzrokuje eksploziju ili požar uzeto je u obzir zbog brojne električne opreme koja može dati iskrvu u strojarnici. Kalkulacije količine propuštanja kao funkcija vremena, i količina ventilacijskog toka zraka primijenjuju se kao ulazni podaci u analizi eksplozije i požara.

Rezultati analize prika-zuju da navedeni ekstremni slučaj nebi strukturno oštetio strojarnicu niti bi bila ugrožena područja izvan strojarnice. Zbog dodatne sigurnosti kontrolna soba na LNG brodu mora biti zaštićena izolacijom od požara. Kao rezultat navedenog istraživanja klasifikacijsko društvo propisuje dodatne uvjete sigurnosti koje sustav mora ispuniti:

- dvostruki cjevovod mora biti smješten što dalje od kritičnih pregrada i oplata kao što su oplata spremnika za gorivo i pregrade središnje ploče,
- u slučaju požara u strojarnici alarmni sustav šalje signal za zatvaranje dotoka plina, za zaustavljanje ventilatora u strojarnici i za blokiranje dobavnih kanala zraka
- bilo koji kvar na sustavu ventilacije strojarnice izazvat će zaustavljanje dotoka plina u sustav

- dvostruki cjevovod mora biti dizajniran da apsorbira temperaturne razlike između okoline i unutrašnjosti cjevovoda.

GORIVNA FLEKSIBILNOST DIZEL MOTORA / Fuel flexibility of diesel engine

Jedna od prednosti ME-GI dizelskog motora je njegova gorivna fleksibilnost, od koje LNG prijevoznik svakako može imati koristi. Izgaranje isparenog plina s varijacijom toplinske vrijednosti je pogodno za dizelski princip rada. Na početku putovanja s teretom, prirodno ispareni plin sadrži veću količinu dušika i toplinska vrijednost je niska. Ako je plin prisilno isparen, može sadržati etan i propan, a toplinska vrijednost u tom slučaju je veća.

Ubrzavanjem plina varijabilnog sastava pod visokim tlakom kod dvotaktnih motora moguće je postići izgaranje bez pada toplinske učinkovitosti motora.

Postavljena minimalna količina dizelskog goriva, kao pilot goriva koje će se koristiti, je između 5-8%, ovisno o kvaliteti a dizelska goriva HFO i MDO mogu se koristiti kao pilot gorivo. Minimalni postotak pilot goriva se proračunava pri 100% opterećenju motora, i konstantan je pri rasponu opterećenja od 30 - 100%. Ispod 30% opterećenja proizvođač motora nije u mogućnosti jamčiti stabilno izgaranje plina i pilot goriva u motoru zato se, prilikom dostizanja donje granice opterećenja, motor vraća upotrebi dizelskog goriva kao jedinog goriva odnosno u tzv. dizelski model rada.

Plinskom gorivu odgovaraju nisko sumpora tekuća dizelska goriva kao pilot goriva i u ovom slučaju preporučuje se koristiti cilindarsko ulje TBN 40. Teško dizelsko gorivo s visokim sadržajem sumpora zahtijeva cilindarsko ulje TBN 70. Brodovlasnicima koji koriste dizelska goriva s visokim sadržajem sumpora na duži rok preporučuje se instalirati dva tanka za različita cilindarska ulja. Kada se mijenjaju gorivni modeli, s plinskog na dizelski i obratno, potrebno je provesti i promjenu korištenja cilindarskog ulja.

REZULTATI ISPITIVANJA RADA ME-GI DIZEL MOTORA / Working test results of ME-GI diesel engine

U cilju nastavka istraživanja ME-GI motora, tvrtka MAN B&W je ispitala istraživački motor 4T50ME-X koji je obnovljen kao 4T50ME-GI-X motor da bi se omogućilo ispitivanje rada motora na prirodni plin.

U ovom dijelu rada prezentirane su performanse i mjerenja

emisija na 4T50ME-GI-X dizelskom motoru. Prikazani rezultati poslužili su kao osnovica za daljnja istraživanja i kao pokazatelj potencijala ME-GI u smislu smanjenja emisije štetnih plinova i smanjenja specifične potrošnje dizelskog goriva (SFOC – specific fuel oil consumption) i plinskog goriva (GC – gas consumption).

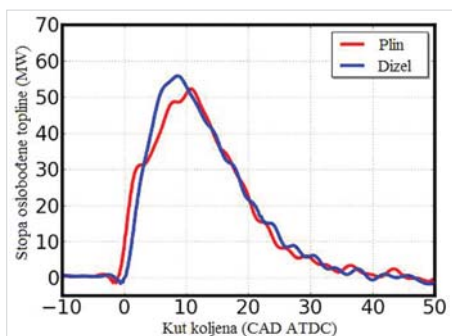
Od ukupno osam ispitivanja rada motora prikazana su četiri referentna ispitivanja za dizelski model rada i četiri za plinski model rada. Oba načina ispitivanja provedena su pri 25, 50, 75, i 100% opterećenju na broju okretaja zadanim krivuljom propelera. Izmjerene količine pilot goriva ispitivanjima GI1-GI4 date su u tablici 1. Rezultati pokazuju da je izvediv rad u plinskom modelu s količinom pilot goriva u vrijednosti 5% (ili manje) od iznosa MCR motora.

Tablica 1. Potrošnja pilot goriva
Table 1 Pilot fuel consumption

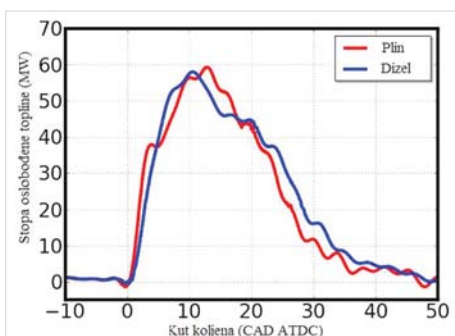
Test	Opterećenje (%)	Količina pilot goriva	
		(% stope topline)	(% MCR)
GI1	25	11.3	3.0
GI2	50	7.3	3.6
GI3	75	4.7	3.4
GI4	100	4.4	4.4

Stopa oslobođene topline / Heat release rate

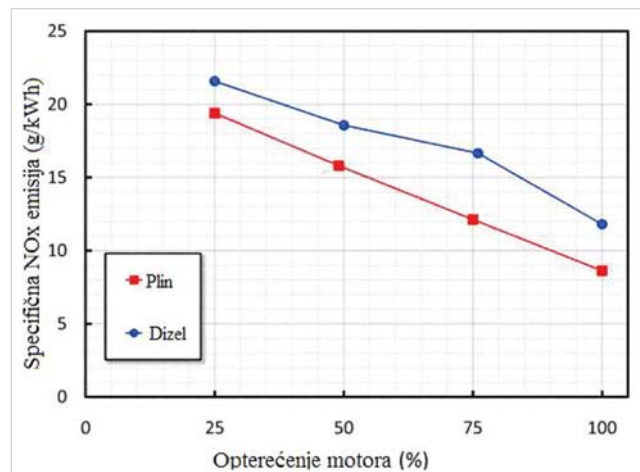
Izračunate stope oslobođene topline prikazane su na slikama 10. i 11. Kao što je prikazano na slici 10, pri 75% opterećenju, stopa oslobođene topline za plinsko gorivo približava se stopi za dizelsko gorivo, iako se pojavljuju manje razlike. Slična je situacija i kod 100% opterećenja, uz nešto manje stope oslobođene topline kod plinskog goriva, pogotovo kako proces izgaranja u cilindru ide prema kraju.



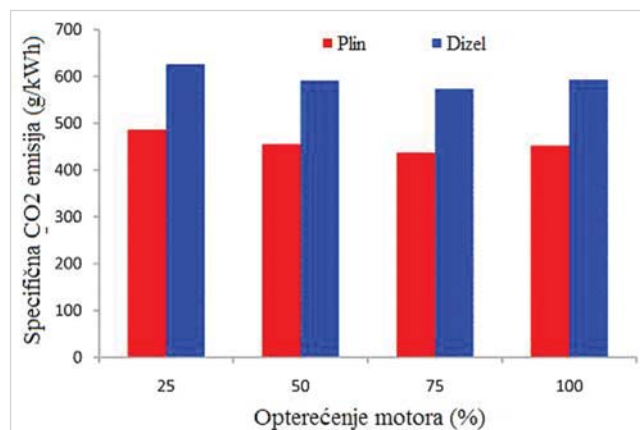
Slika 10. 75% opterećenje, stopa oslobođene topline
Figure 10 75% load, heat release rate



Slika 11. 100% opterećenje, stopa oslobođene topline
Figure 11 100% load, heat release rate



Slika 12. Specifična NOx emisija
Figure 12 Specific NOx emission



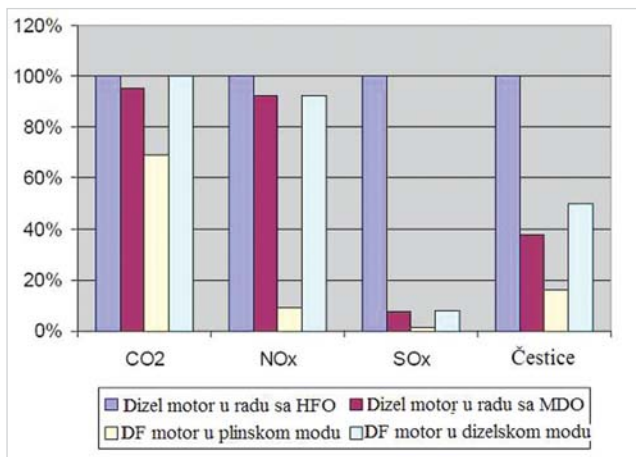
Slika 13. Specifična CO2 emisija
Figure 13 Specific CO2 emission

Emisija / Emission

Specifične emisije štetnih plinova prikazane su na slici 12. i 13. Na slici 12. jasno se vidi da je emisija NOx značajno smanjena. Smanjenje je najmanje pri niskom opterećenju, a najviše pri 75% opterećenja. NOx vrijednosti za dizelsko i plinsko gorivo su 15,7 g / kWh i 11,9 g / kWh, odnosno smanjenje NOx je približno 24%. Pod pretpostavkom kemijske ravnoteže i stehiometrijskog izgaranja procjenjuje se da plinsko gorivo ima 30% manju emisiju NOx spojeva, prvenstveno zbog niže temperature izgaranja. Niža temperatura izgaranja, unatoč većim ogrjevnim vrijednostima, rezultira većom količinom zraka potrebnog za izgaranje, a time i većeg toplinskog kapaciteta od stehiometrijske smjese.

Na slici 13. može se primijetiti da su i vrijednosti CO₂ uglavnom smanjene za isti stupanj, neovisno o opterećenju motora (približno 23%). Razina smanjenja je funkcija količine pilot goriva, kvalitete (sadržaj ugljika / LCV – low carbon value) dizelskog goriva i kvalitete plina. Također se može primijetiti da se emisija CO općenito smanjila pri upotrebi plinskog goriva, a to je najizraženije pri niskom opterećenju. Tako je i količina dima/čade općenito povezana s emisijom CO. ME-GI motor bi trebao imati čak i bolje karakteristike emisije na niskom opterećenju nego ME motor zbog navedenih razloga.

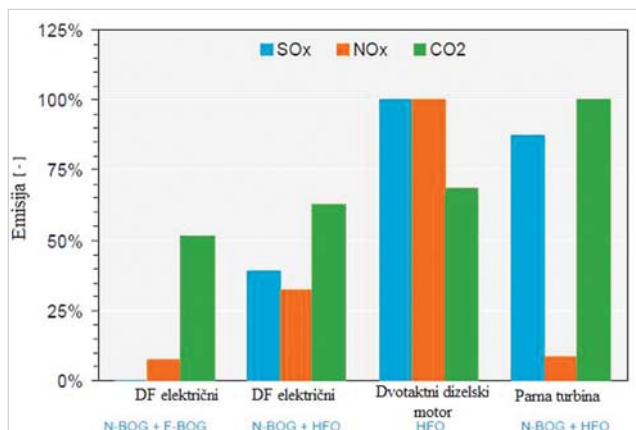
Iznos neizgorenih ugljikovodika (HC) blago se povećava kada se koristi plinsko gorivo.



Slika 14. Emisija za različite vrste goriva
Figure 14 Emission for different types of fuel

Slika 14. prikazuje da motor u plinskom modelu rada ima najmanju emisiju štetnih plinova i najmanji udio neizgorenih čestica. Najveći napredak u odnosu prema dizelskom gorivu HFO i MDO ostvaren je kod emisije NOx.

Slika 15. prikazuje usporedbu emisije štetnih plinova kod dizel-električnog pogona s dvogorivnom četverotaktnim dizelskim motorima pri plinskom i dizelskom modelu rada, kod konvencionalnog dvotaktnog dizelskog motora i kod parnoturbinskog pogona. Također i na ovom primjeru jasno se vidi da dvogorivni dizelski motor u plinskom modelu rada ima najmanju emisiju svih štetnih plinova.



Slika 15. Emisija za različite vrste pogona
Figure 15 Emission for different types of propulsion

Korištenjem LNG plina kao goriva kod dvotaktnih motora, uz gorivnu fleksibilnost, najveća prednost je stalna i predvidljiva cijena LNG-a uz već navedenu znatno smanjenu emisiju štetnih plinova. Također brodove koji koriste plin kao gorivo odlikuje siguran i pouzdan dizajn sustava za dobavu plina.

ZAKLJUČAK / Conclusion

Za ulazak na zahtjevno tržište pogona LNG brodova potrebno je udovoljiti visokim zahtjevima sigurnosti, postići visoku razinu performansi motora i ispuniti visoke ekološke zahtjeve međunarodnih propisa. Prilagođeno ME-GI pogonsko rješenje tvrtke MAN B&W zajedno s sigurnom i učinkovitom opskrbom plina, sustav je koji je sada dostupan operaterima LNG brodova s optimiziranim ključnim pitanjima kao što su učinkovitost, ekonomičnost, zalihost i sigurnost i pogotovo ekološka komponenta.

Sustav se temelji na tehnologiji elektronski upravljanih MAN B&W dvotaktnih dizelskih motora i može se primijeniti sa značajnim prednostima kod LNG prijevoznika u širokom rasponu veličine brodova.

Elektronski upravljani ME-GI motor pokazuje značajnu prednost u optimizaciji procesa izgaranja i veliki korak u učinkovitosti i smanjenju emisije štetnih plinova. Osim sigurnog i pouzdanog rada na plin, ME-GI nudi poboljšanu emisiju ispuštanja ugljika i NOx spojeva u usporedbi sa standardnim ME motorom na konvencionalno dizelsko gorivo. Također dvogorivni dvotaktni dizelski motori imaju niz prednosti u odnosu prema klasičnom parnoturbinskom pogonu na LNG brodovima, pogotovo u pogledu toplinske učinkovitosti, te lagano istiskuju parnoturbinski pogon s LNG tržišta

LITERATURA / References

- [1] <http://www.mandieselturbo.com/files/news/files/8121/5510-0026-00ppr.indd.pdf>
- [2] <http://www.mandieselturbo.com/files/news/files/17351/5510-0063-03ppr/low.pdf>
- [3] http://www.mandieselturbo.com/files/news/files/15699/MAN%20DIESEL%20AND%20TURBO_ME-GI%20ENGINES_ISME585.pdf
- [4] http://www.maritimeexecutive.com/files/Natural%20Gas_A%20Viable%20Marine%20Fuel_Thesis_E__Eastlack.pdf
- [5] <http://www.glmri.org/downloads/IngMisc/LNG%20Propulsion%20System%20as%20Shipyard's%20Perspective-SungJun%20Lee-20%20Sept%202011-II.pdf>
- [6] http://www.cimac.com/cimac_cms/uploads/explorer/other_events_2009/presentation_wartsila.pdf
- [7] DUAL FUEL ENGINES LATEST DEVELOPMENTS Oskar Levander, Director, Concept design, MLS HAMBURG, 27.9.2011