

**ANALIZA UTICAJA PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA GLAVNOG
BRODSKOG MOTORA NA RADNE PARAMETRE I IZDUVNU
EMISIJU**

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF PREVENTIVE MAINTENANCE
OF MAIN ENGINES ON WORKING PARAMETERS AND EMISSIONS**

Vukičević Miroslav MSc (C/Eng), Mraković Ivan SpecApp, Ivošević Špiro, Doc. Dr

**Univerzitet Crne Gore - Pomorski fakultet Kotor
Dobrota 36, 85330 Kotor**

REZIME

Današnji pogonski uređaji značajno doprinose zagađenju vazduha i zagađuju životnu sredinu, naročito ukoliko imaju nepravilan rad ili se nesvjesno zanemare radni parametri i uslovi trenutnog rada broskog motora.

Tokom eksploatacije motora na brodu, zbog lošeg održavanja, regulisanja njegovih pojedinih agregata i djelova, kao i zbog njegove istrošenosti dolazi do toga da parametri radnog procesa na glavnom pogonskom uređaju ne odgovaraju očekivanim karakteristikama koje se dobijaju u normalnom radnom režimu motora.

U ovom radu, simulacijom lošeg raspršivanja goriva koji se izvodi na sertifikovanom simulatoru – omogućava se dobijanje podataka koji se analiziraju, upoređuju sa podacima pri eksploatacionom radu motora kako bi se utvrdio njihov negativni uticaj, te omogućilo pravovremeno održavanje u eksploatacionim uslovima.

Ključne riječi: preventivno održavanje, motor, izduvna emisija, simulator

ABSTRACT

Today's propulsion devices significantly contribute to air pollution, affecting the marine environment. Especially if they have irregular work or are unconsciously disregarding the operating parameters and conditions for the current operation of the marine engine.

During the exploitation of the engine on board, due to poor maintenance, the regulation of its individual aggregates and parts, as well as due to the wear itself, the operating process parameters on the main propulsion engine do not correspond with the expected characteristics obtained in the normal operation of the engine itself.

The simulation of poor fuel spraying is done on a certified simulator - the obtained data is analyzed, compared with the data in the normal operation of the engine in order to determine their negative impact and enable proper maintenance.

Key words: preventive maintenance, engine, emissions improper engine operation, simulation of fuel spraying,

1. UVOD

Današnji pogonski sistemi koriste prvenstveno dizel motore, a u manjoj mjeri parne turbine koje koriste pregrijanu paru dobijenu sagorijevanjem goriva u parnom kotlu, a još rjeđe plinske turbine. Procjenjuje se da 50% energije potrebne za sve svjetske trgovine isporučuju motori firme MAN [1].

Pri normalnom radu glavnog motora dobijaju se radni parametri i snimaju se pravilni indikatorski dijagrami. Simulacijom rada motora pri lošem održavanju prouzrokuju se promjene prilikom snimanja indikatorskog dijagrama i dolazi do promjena radnih karakteristika motora.

2. PREDMET ISTRAŽIVANJA

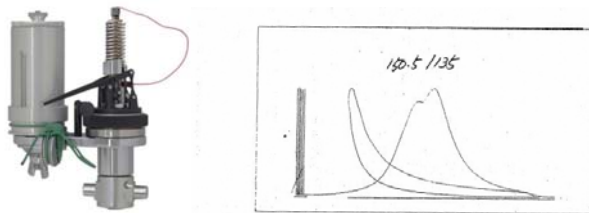
Dizel motor, tip MC, je dvotaktni dizel motor s direktnim ubrizgavanjem i sa centralno smještenim izduvnim ventilom. MAN Diesel & Turbo je jedan od vodećih svjetskih dizajnera i proizvođača motora sa niskom i srednjom brzinom. Izvještaj o probnom testiranju motora tkz. *shop test report*, MAN 6S60MC korišćen je prilikom analize radnih parametara i snimanja indikatorskog dijagrama motora u stvarnim uslovima [5]. Ti podaci su upoređivani sa podacima dobijenim na brodskom simulatoru ERS 5000 TechSim koji se nalazi na Pomorskom fakultetu u Kotoru. Dobijene vrijednosti za: srednji efektivni pritisak, maksimalni pritisak sagorijevanja, index pumpe goriva snimljen na probnom testiranju su upoređeni sa brodskim simulatorom u normalnim uslovima pri brzini od 105 min^{-1} i gotovo su identični. Zbog toga se može zaključiti da je brodski simulator validan za ovo istraživanje. Uz pomoć brodskog simulacionog softwar-a MAN tip *6S60MC* rusko-britanskog proizvođača Transas oznake, u mogućnosti smo da simuliramo uticaj lošeg održavanja, da precizno analiziramo dobijene podatke i da imamo uvid na uticaj same emisije u datim okolnostima što nije moguće kod motora na brodovima u eksploataciji. Osnovne karakteristike motora dostupnog za analizu su prikazane u tabeli 1.

Tabela 1. Osnovne tehničke karakteristike motora MAN 6S60MC [2]

Proizvođač	MAN B&W
Tip	6S60MC
Prečnik	600 mm
Broj cilindara	6
Maksimalna snaga pri brzini od 105 min^{-1}	13 736 kW
Normalna snaga(85% maksimalne snage) pri brzini od $101,4 \text{ min}^{-1}$	12 364 kW
Servisna brzina	15.5 čv

2.1. Simuliranje radnog procesa i snimanje indikatorskog dijagrama

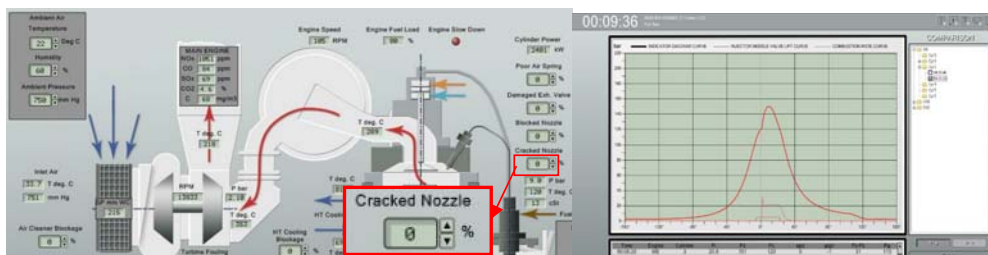
Analizirani MAN'ov motor na brodskom simulatoru ima mogućnost izbora kako svih tako i pojedinačnih cilindara za analizu. U ovom radu je analiziran srednji cilindar motora (br. 3). Kako bi se dobio uvid u radne parametre i kvalitet rada motora, potrebno je da se snimi indikatorski dijagram u normalnim atmosferskim uslovima, bez uticaja vjetera, morske struje, talasa i bez oštećenja na motoru. Danas na brodovima uglavnom postoje barem dva načina snimanja indikatorskih dijagrama (mehanično-ručno i električno uz pomoć softvera za analizu koji je spojen sa kompjuterom). Ukoliko bi došlo do neispravnosti uređaja, tada se pristupa ručnom uzimanju dijagrama uz pomoć uređaja na slici (2.1.a.). Izgled snimljenog dijagrama na atmosferskoj liniji i nizom pritisaka od kojih se srednji uzima kao relevantni (slika 2.1.b.). Na samom papiru mogu biti upisani podaci broda, datum, broj obrtaja, koji je cilindar i izmjereni pritisci.



Slika 2.1. a.) Primjer uređaja za ručno snimanje indikatorskog dijagrama [6], b.) dobijeni podaci pri 100% opterećenja i 105rpm na testnom stolu [5]

Simulacija je izvršena na cilindru br. 3 u normalnim radnim, atmosferskim uslovima (slika 2.2.) pri :

- maksimalnoj brzini (*full sea*) tj. od 105 obrtaja (*rpm*), snage po cilindru od 2401 kW, dovedenog goriva od 9,0 bar sa temperaturom goriva od 120°C i viskoziteta od 13cSt.
- za sve testirane uslove su se koristili ambijentalni parametri kao (22°C ambijentalne temperature, 60% vlažnosti i ambijentalnom pritisku od 750mmHg).



Slika 2.2. Primjer dobijenih podataka testiranog cilindra broj 3 pri datim atmosferskim uslovima, pravilnim održavanjem i izgled indikatorskog dijagrama [3]

Dobra strana kod električnog snimanja indikatorskog dijagrama je ta da se, pored ostalih podataka, odmah ispišu i vrijednosti maksimalnih pritisaka, dok kod ručnog načina je potrebno precizno izmjeriti. Pri mjerenju indikatorskog dijagrama električnim putem možemo birati i formu samog dijagrama [8], te podešavati veličinu dijagrama, zatim mogućnost brzog montiranja, dobijanja preciznih podataka, lako održavanje, prebacivanje u kompjuterski sistem pri čemu se dobija na preglednosti i istoriji održavanja kako bi se stekla prava slika o stanju motora. Treba napomenuti da pri pritiscima od 180 bara, odstupanje između pojedinih cilindara ne smije biti veće od 5 bara, te ukoliko se to desi potrebno je hitno istražiti detalje svih mogućih razloga koji mogu uzrokovati ovu nedopustivo visoku devijaciju.

Uz pomoć ove opreme, koja mora biti kalibrirana i sertifikovana, mogu se precizno izmjeriti pritisci u odnosu na ugao radilice motora. Sa svim dobijenim informacijama iz mjerenja, mogu se odrediti potrebni koraci na preventivnom održavanju motora ili pak u traženju profesionalnog servisa. Preporučljivo je da se mjerenje obavi svaka 3 mjeseca (pojedine kompanije tkz. *engine performance* ili analizu performanse motora rade na 1000 radnih sati). Teži se da motor radi na većem opterećenju – minimum 80% opterećenja, a ako je moguće zbog specifičnosti i sigurnosti plovidbe čak i više kako bi se dobile što tačnije informacije o motoru.

Izmjerene vrijednosti na motoru treba da se upoređuju sa podacima dobijenim na testnom stolu, kada je motor bio nov i posmatrati eventualna odstupanja i tendencije. Dodatna

mjerenja treba uraditi nakon servisiranja motora i ako se:

- temperatura izduvnih plinova povećava ili smanjuje,
- povećava potrošnja goriva, te
- ukoliko postoji neispravnost kod poluge pumpe goriva za svaki cilindar itd.

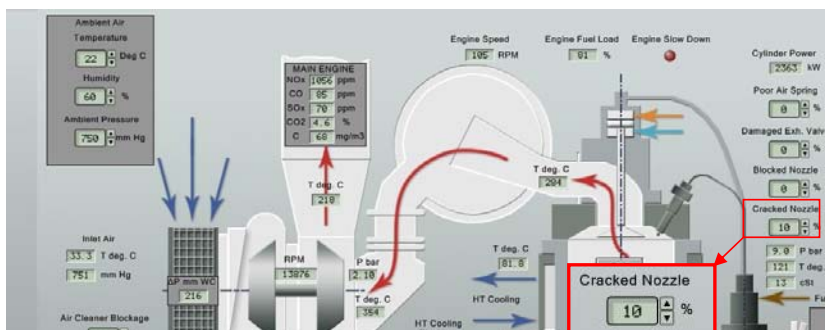
2.2. Analiza rezultata u slučaju povećanja napuknuća na rasprskivaču u procentima

Uz pomoć samog simulatora je moguće simulirati greške na rasprskivaču u vidu napuknuća i začepljenja, te snimiti dijagrame u tim uslovima. Još jedna dobra strana simulatora je što daje mogućnost simuliranja procentualnog napuknuća na rasprskivaču i procentualnog začepljenja što u brodskim uslovima nije moguće. Na ovaj način se daje na uvid koliko se mijenjaju parametri na samom motoru pri različitim oštećenjima na brodskom motoru.

Kada se desi da se radi analiza za sve cilindre zbog same tačnosti podataka, uzimanje uzorka se može ponoviti nekoliko puta – tada se može desiti da dođe do zagrijavanja, pa čak i pregrijavanja instrumenata i da u tom trenutku više ne dobijamo pravilne podatke. Naravno, u tom trenutku treba dozvoliti instrumentu da se ohladi 10-15min., pa tek kasnije da se nastavi sa uzimanjem podataka.

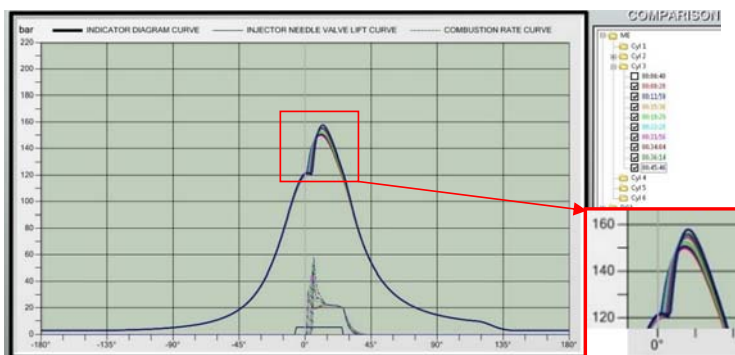
Nakon snimanja svih indikatorskih dijagrama, preporučuje se da se grupišu svi pojedinačni dijagrami na samo jedan list (monitor), jer omogućuje mnogo lakše da se otkriju razlike između pojedinih cilindara. [7]

Na slici 2.3. su prikazani podaci motora u testiranim uslovima u trenutku kada se nalazi mala napuklina od 10% na rasprskivaču koji se nalazi u cilindru broj 3. Kako sami motor ima tendenciju da održi stalni broj obrtaja i zadatu brzinu od 105 rpm, tako će se u ovom radu pratiti što se dešava sa snagom motora, emisijom kao i kako se dalje procentualno povećanje napukline na rasprskivaču reflektuje na indikatorski dijagram i maksimalne pritiske.

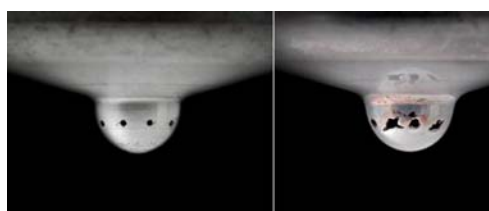


Slika 2.3. Primjer analiziranih podataka pri procentualnoj napuklini rasprskivača goriva testiranog cilindra broj 3 [3]

Da bi se dobila jasnija slika o lošem uticaju napuknuća na rasprskivaču, u ovom radu će se analizirati napuknuća od 10-90% i snimiti dijagrami za sva oštećenja u vremenskim razmacima. Na slici 2.4. su prikazani podaci koji su bitni za analizu dijagrama; vremena simuliranja napuknuća, broj testiranog cilindra, pi- srednji efektivni pritisak, pz- maksimalni pritisak sagorijevanja, pc- pritisak sagorijevanja, □pz- ugao tajminga, □ign- ugao početka sagorijevanja kod svih testiranih slučajeva.

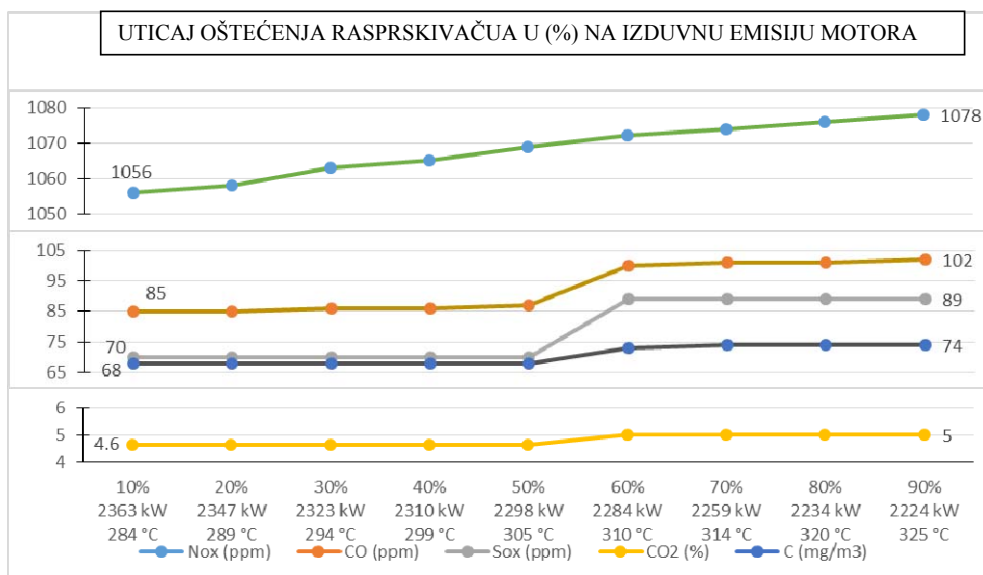


Slika 2.4. Indikatorski diagram testiranog cilindra broj 3 pri procentualnom oštećenju od 10-90% [3]



Slika 2.5. Primjer napuknuća na rasprskivaču goriva [4]

Kako procentualno oštećenje na rasprskivaču motora utiče na snagu motora tj. radne parametre i izduvnu emisiju, najbolje je vidljivo na slici 2.6.



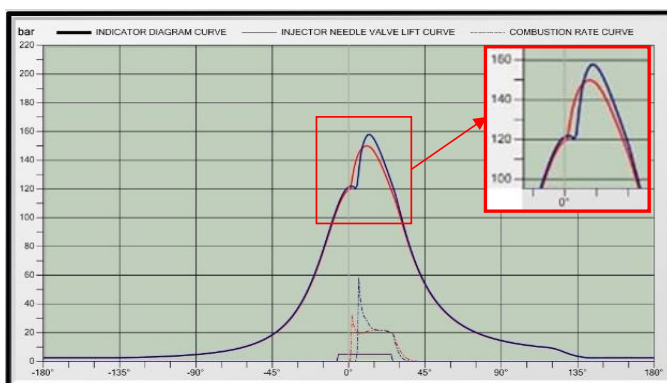
Slika 2.6. Uticaj napuknuća na rasprskivaču od 10-90% i njihov uticaj na radne parametre motora kod cilindra broj 3 [3]

Analizom dobijenih podataka iz slike 2.6. može se vidjeti da porastom napuknuća na rasprskivaču dolazi do konstantnog pada snage motora u tom cilindru sa 2363 kW na 2224 kW kod 90% opterećenja, što je pad od 6%. Osim toga vidljiv je takođe konstantan porast

temperature izduvnih gasova za 41°C (sa 284°C na 325°C) i rast emisije NO_x-a sa 1056 ppm na 1078 ppm,tj. za 22 ppm. Osim porasta NO_x pri ovom sagorijevanju dolazi i do blagog rasta emisije CO, Sox, CO₂ i C.

Porastom koncentracije izduvne emisije dodatno se otežava rad motora i teže je ispuniti sve striktnija ograničenja koja propisuje MARPOL konvencija –Anex VI vezana za područja ECAS¹ i SO_x Emission Control Areas (SECAS)²., pogotovo bez sekundarne metode smanjenja emisije kao što su brodski prečišćivači *scrubbers* ili *SCR selective catalytic reduction* itd.

Uočavanje tih promjena koje se odnose na napuknuće rasprskivača u cilindru je moguće upoređivanjem snimljenih indikatorskih dijagrama. Očigledna razlika između minimalnog i maksimalnog analiziranog napuknuća je vidljiva na zajedničkoj slici 2.7. u vidu ”otvorenog” dijagrama (*P-φ*) sa dijagramom pritiska ubrizgavanja goriva (isprekidana linija) i ”zatvorenog” indikatorskog dijagrama snage (*p-v*).



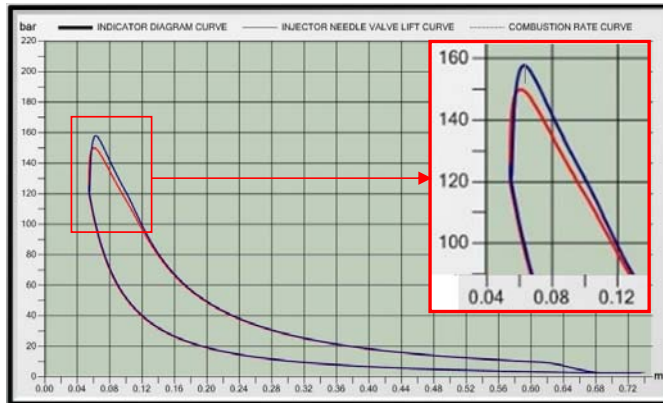
Slika 2.7. Poređenje indikatorskih dijagrama kod 10% i 90% napuknuća rasprskivača goriva testiranog cilindra broj 3 [3]

Kod otvorenog indikatorskog dijagrama na horizontalnoj osi je predstavljen ugao radilice motora za dati cilindrar u stepenima (°), a na vertikalnoj osi je pritisak izražen u *bar*. Pri izradi zatvorenog dijagrama (kako bi bio vidljiv pad snage) u horizontalnoj osi je predstavljena zapremina cilindra u *m*³ dok je u vertikalnoj osi pritisak izražen takođe u *bar*. Crvenom bojom je označen snimljeni indikatorski dijagram kod glavnog motora pri minimalnom napuknuću rasprskivača od 10 % a plavom bojom od 90% . Analizom dijagrama može se utvrditi da postoji vidljiva razlika pri:

- završetku kompresionog takta i razlike od od 2 bar pri kompresionom pritisku (*p_c*),
- početka sagorijevanja,
- poprilična razlika kod maksimalnog pritiska sagorijevanja (*p_z*) od 8 bar,
- dok je primjetna i razlika od 0.6 bar kod srednjeg efektivnog pritiska (*p_i*).

¹ ECAS - Emisije u kontrolisanim područjima, kao što su *North American ECA*, koji je stupio na snagu u 2012. godini.

² SECAS - *SO_x Emission Control Areas SECAS* koje su bile na snazi na Baltičkom moru, Sjevernom moru i engleskom kanalu od 2006. i 2007. godine , a od 1. avgusta 2012. godine se odnosi i na Sjevernu Ameriku (ECA) .



Slika 2.8. Primjer PV-indikatorskog dijagrama dobijenih pri minimalnom i maksimalnom testiranom napuknuću rasprskivača goriva testiranog cilindra broj 3 [3]

Promjena snage u cilindru je vidjiva snimanjem zatvorenog (p-v) indikatorskog dijagrama (slika 2.8.) gdje crvena boja prezentuje snagu cilindra sa malim napuknućem od 10 % dok plava boja na dijagramu prikazuje maksimalno napuknuće od 90 %.

Iz navedene analize može se zaključiti kako sa povećanjem napuknuća na rasprskivaču raste naglo i maksimalni pritisak u cilindru. Kako se ova promjena manifestuje lošijim sagorijevanjem, ista je praćena povećanjem temperature izduvnih gasova a samim tim lošijom emisijom iz motora.

Tabela 2. Upoređenje radnih parametara kod normalnog rada motora i pri lošem održavanju rasprskivača [3]

Uticaj lošeg održavanja rasprskivača goriva po cilindru na radne parametre motora		
Loše održavanje u vidu:	Normalni radni parametri	od 10-90% napuknuće na rasprskivaču kod cilindra broj 3
Promjena srednjeg efektivnog pritiska	20,8 bar	Porast pritiska sa 20,8 bar na 21,4 bar
Promjena maksimalnog pritiska	151 bar	Porast pritiska sa 151 bar na 159 bar
Promjena pritiska sagorijevanja	120 bar	Porast pritiska sa 120 bar na 122 bar
Promjena snage po cilindru	2388 kW	Pad snage od 2363 kW do 2224 kW
Promjena temperature izduvnih gasova iz cilindra	299 °C	Porast temperature sa 284 °C na 325 °C

Sagledavanjem podataka iz tabele 2 (tj. upoređivanjem rezultata ispravnog motora sa rezultatima motora koji radi sa oštećenim rasprskivačem), uočljiv je uticaj lošeg održavanja koji se odražava na radne parametre motora. Pa tako, u slučaju kada raste napuknuće na rasprskivaču, dolazi do rasta svih pritisaka što se može uočiti snimanjem indikatorskih dijagrama i preventivno uticati na sami rad motora, tj. što prije zamijeniti oštećeni rasprskivač, testirati ga i uraditi dijagnostiku kako bi se otklonili eventualni kvarovi koji su doveli do samog oštećenja. Uporedo sa radnim pritiscima raste i temperatura izduvnih gasova, dok je izražen blagi pad snage po cilindru. Padom snage motora smanjuje se njegova efikasnost, dok porastom izduvne temperature iz motora za očekivati je da se javi i alarm koji će označiti devijaciju između svih cilindara i ukazati nam na loš rad motora.

3. ZAKLJUČAK

Kako bi se izbjeglo skupo održavanje na brodu, spriječilo ranije ili bespotrebno mijenjanje radnih elemenata na brodskom motoru, smanjila potrošnja goriva, moguće je upotrebom sofisticiranih software-a analizirati rad svih motora na brodu, snimati indikatorske dijagrame (u zavisnosti od režima rada, tj. opterećenja) i na osnovu njih donijeti odluku o stanju elemenata.

Loše ili nekvalitetno održavanje prije ili kasnije će se odraziti i na zagađenje vazduha sa brodova koje je postalo jedno od vodećih pitanja u svijetu, te je neophodno pratiti vrijednosti te emisije i na vrijeme prepoznati stanje uređaja i potrebu za održavanjem. Emisije iz brodskih motora se smatraju jednim od najvećih problema kada je u pitanju pomorski saobraćaj. Njihov negativni uticaj po morsku i životnu sredinu se ne ogleda samo na lokalnom, već i na regionalnom nivou. Praćenje izduvne emisije sa brodova je neophodno kako bi se ispoštovao Aneks VI MARPOL Konvencije.

Sprovedene analize su pokazale kako se može snimanjem indikatorskog dijagrama(otvorenog i zatvorenog) na brodskom simulacionom softveru ERS 5000 TechSim, imati uvid u nastalim grafičkim promjenama kao i nastalim promjenama pritisaka koji se automatski izračunavaju. Uvidom u snimljene dijagrame se može sa preciznošću ustanoviti greška kod pojedinačnog cilindra i suziti dalja dijagnostika. Na ovaj način se štedi vrijeme, novac a i lakše je organizovati posadu pri samom remontu jer se tačno precizira koji dio na motoru je prouzrokovao same promjene.

Procedura snimanja indikatorskog dijagrama nije komplikovana ali je od vitalnog značaja poznavanje samog rada i analiza dobijenih podataka koje su obuhvaćene i prezentovane u ovom radu.

U slučaju napuknuća rasprskivača ne dolazi do prevelikih promjena,aktiviranja alarma, pa ni pri 90 postotnom napuknuću. Međutim, nastale promjene se mogu uočiti prilikom snimanja indikatorskih dijagrama i na njih preventivno uticati, kako bi se smanjili parametri izduvne emisije i radni parametri vratili u normalnom opsegu.

Glavni brodski motor je kompleksan uređaj i pravilno dijagnosticiranje problema je od velike važnosti kako za sami motor tako i za brod u globalu.

4. LITERATURA

- [1] Vukičević, M.: Mogućnost upotrebe simulacionih softvera u cilju predikcije emisije oksida azota (NOx) iz brodskog motora MAN B&W, Pomorski fakultete Kotor 2015,
- [2] Instrukcioni manual za motor MAN B&W 6S 60MC,
- [3] Transas simulator 2016,
- [4] <http://www.trucktrend.com/how-to/expert-advice/1211dp-why-diesel-fuel-injectors-fail/#photo-07>,
- [5] Doosan engine Co.Ltd. Shope test record -ME test record of engine 6S 60MC, pdf.,
- [6] <http://www.leutert.com/maritime-division/en/products/indicator-type-50.php?lang=EN>,
- [7] Roman A. Varbanet, Sergey A. Karianskiy: Analyse of marine diesel engine performance, Gdansk University of Technology 2012,
- [8] Woodyard, D.: Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines eight edition, Engleska 2004.