

# Opis sustava upravljanja snagom i sustava upravljanja motorima na dvojno gorivo na primjeru broda za prijevoz UPP s dizel-električnom propulzijom

---

Stipanov, Mario

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:576663>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-10**



**Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**  
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**POMORSKI FAKULTET**

**MARIO STIPANOV**

**OPIS SUSTAVA UPRAVLJANJA SNAGOM I SUSTAVA  
UPRAVLJANJA MOTORIMA NA DVOJNO GORIVO NA  
PRIMJERU BRODA ZA PRIJEVOZ UPP S DIZEL-  
ELEKTRIČNOM PROPULZIJOM**

**ZAVRŠNI RAD**

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**

**POMORSKI FAKULTET**

**OPIS SUSTAVA UPRAVLJANJA SNAGOM I SUSTAVA  
UPRAVLJANJA MOTORIMA NA DVOJNO GORIVO NA  
PRIMJERU BRODA ZA PRIJEVOZ UPP S DIZEL-  
ELEKTRIČNOM PROPULZIJOM**

**DESCRIPTION OF POWER MANAGEMENT SYSTEM AND  
DUAL FUEL ENGINE MANAGEMENT SYSTEM ON THE  
EXAMPLE OF THE LNG SHIP WITH DIESEL-ELECTRIC  
PLANT**

**ZAVRŠNI RAD**

Kolegij: Rad na simulatoru 1

Mentor/komentor: Dean Bernečić, Josip Dujmović

Student: Mario Stipanov

Studijski smjer: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112082832

Rijeka, 14. rujan 2023.

Student: Mario Stipanov

Studijski program: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112082832

## IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom :

**„Opis sustava upravljanja snagom i sustava upravljanja motorima na dvojno gorivo na primjeru broda za prijevoz UPP s dizel-električnom propulzijom“** izradio samostalno pod mentorstvom prof.dr.sc. Deana Bernečića, te komentorstvom mr.sc. Josipa Dujmovića.

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrizirajući naveo u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezao s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student:



Ime i prezime studenta:

Mario Stipanov

Student: Mario Stipanov

Studijski program: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112082832

IZJAVA STUDENTA – AUTORA  
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa završnim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog završnog rada kao autorskog djela pod uvjetima Creative Commons licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student - autor



## SAŽETAK

U ovom radu se opisuju motori koji rade na dvojno gorivo u svrhu potpunog iskorištavanja isparenih para prirodnog plina s brodova za prijevoz ukapljenog prirodnog plina (UPP). Rad se sastoji od 4 poglavlja u kojima je detaljno objašnjena dizel-električna propulzija s motorima na dvojno gorivo („DFDE“) na LNG brodu. U uvodu je objašnjeno zašto se takav sustav koristi te od čega se sastoji. Nadalje, u radu je detaljno opisano i objašnjeno kako ti motori funkcioniraju te problematika koja se javlja oko tih motora. Objašnjavaju se režimi rada ovih motora te kako postupiti u određenim režimima. Spominju se specifični pojmovi kao što su skliz metana te detonacije u cilindrima koje se razlikuju od onih kod konvencionalnih motora. U drugom dijelu se opisuje sustav upravljanja energijom na brodu. Objašnjen je sustav upravljanja razdiobom radne i jalove snage te energije koja se koristi na brodovima s motorima na dvojno gorivo i dizel-električnom propulzijom.

Ključne riječi: detonacije, dizel-električna propulzija, motori na dvojno gorivo, skliz metana.

## SUMMARY

This document describes the use of dual-fuel engines for the purpose of fully exploiting evaporated natural gas vapors from LNG carriers. The paper consists of 4 chapters in which diesel-electric propulsion with dual-fuel engines ("DFDE") on an LNG ship is explained in detail. The introduction explains why such a system is used and what constitutes propulsion on the observed ship. Furthermore, the document describes in detail how these engines function and the problems that arise around these engines. The operating modes of these engines are explained and how to proceed in certain modes. Specific terms such as methane slip and detonations in cylinders that differ from those of conventional engines are mentioned. The second part describes the energy management system on board. The system of control of the distribution of working and reactive power and energy used on ships with dual-fuel engines and diesel-electric propulsion is explained.

Keywords: detonations, diesel-electric propulsion, dual-fuel engines, methane slide.

# SADRŽAJ

|                                                                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>SAŽETAK .....</b>                                                                                             | <b>II</b>  |
| <b>SUMMARY .....</b>                                                                                             | <b>II</b>  |
| <b>SADRŽAJ .....</b>                                                                                             | <b>III</b> |
| <b>1. UVOD .....</b>                                                                                             | <b>1</b>   |
| <b>2. MOTORI NA DVOJNO GORIVO .....</b>                                                                          | <b>2</b>   |
| 2.1. Dizelski režim rada .....                                                                                   | 4          |
| 2.2. Režim rada u pripravnosti („Backup“) .....                                                                  | 5          |
| 2.3. Sustav plina .....                                                                                          | 5          |
| 2.3.1. <i>Plinski režim rada</i> .....                                                                           | 7          |
| 2.4. Detonacije u cilindru (Engl. „Knocking“) .....                                                              | 7          |
| 2.5. Rasprski .....                                                                                              | 8          |
| 2.6. Sustav plinskog goriva .....                                                                                | 10         |
| 2.7. Metanski skliz .....                                                                                        | 12         |
| <b>3. SUSTAV UPRAVLJANJA SNAGOM .....</b>                                                                        | <b>13</b>  |
| 3.1. Električni regulator tlaka u sustavu razdiobe energijom (Eng. „Power Management Electronic Governor“) ..... | 15         |
| 3.2. Sustav upravljanja plinom (GMS) .....                                                                       | 18         |
| 3.3. Automatski povratak energije na mrežu .....                                                                 | 20         |
| 3.4. Upravljanje propulzijskim elektromotorima .....                                                             | 21         |
| 3.4.1. <i>Upravljanje brzinom</i> .....                                                                          | 21         |
| 3.4.2. <i>Uređaj za sinkronizaciju faza</i> .....                                                                | 21         |
| 3.4.3. <i>Statički pretvarači frekvencije</i> .....                                                              | 22         |
| 3.4.4. <i>Pogonski elektromotori i pobuda</i> .....                                                              | 23         |
| 3.4.5. <i>Minimalno opterećenje – zaustavljanje broda vožnjom svom snagom krmom</i> .....                        | 23         |
| <b>4. ZAKLJUČAK .....</b>                                                                                        | <b>24</b>  |
| <b>LITERATURA .....</b>                                                                                          | <b>25</b>  |
| <b>POPIS SLIKA .....</b>                                                                                         | <b>27</b>  |

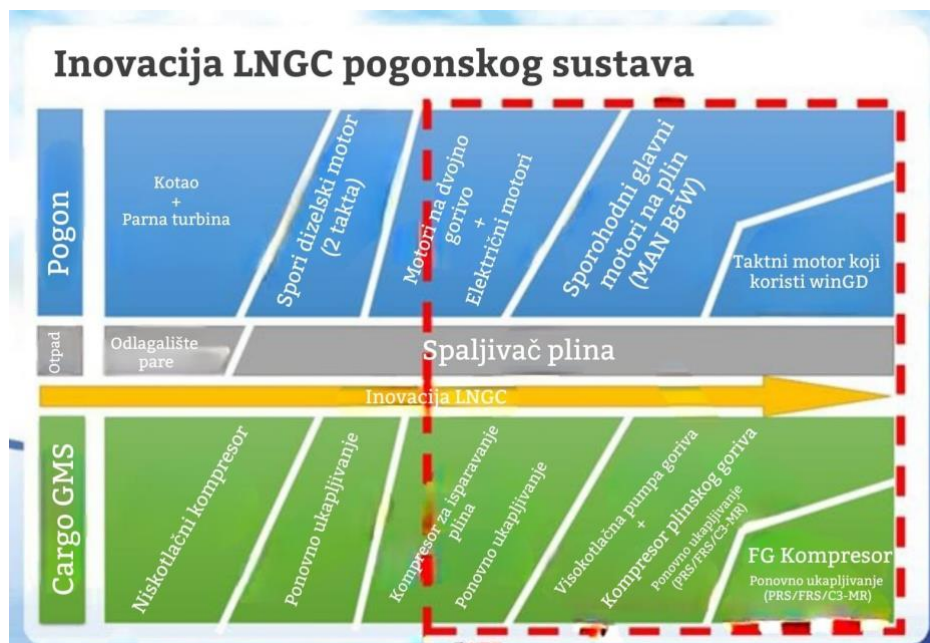
## 1. UVOD

Prirodni plin pronalazi sve veću primjenu u modernom društvu te je njegova potražnja povećana. Prirodni plin se prevozi kopnenim putevima pomoću cjevovoda u plinovitom obliku i pomorskim putem pomoću LNG brodova, u tekućem stanju. Radi lakšeg transporta u pomorstvu, prirodni plin se ukapljuje na  $-161,5^{\circ}\text{C}$  pri atmosferskom tlaku, te se time njegov volumen smanjuje za 600 puta. Zbog toplinskih gubitaka u tankovima dolazi do njegovog isparavanja (Eng. „Boil-off gas“, BOG). Postoje sustavi za ponovno ukapljivanje plina, međutim, oni zahtijevaju jako puno energije. Druga opcija je spaljivanje toga plina u spaljivaču plina (Eng. „Gas Combustion Unit“, GCU) ili korištenje motora na dvojno gorivo (Eng. „Dual Fuel“, DF). Prednosti DF motora je ta da ga operateri mogu prebacivati na određeno gorivo ovisno o vanjskim faktorima kao što su cijena goriva, vanjska temperatura okoline te ovisno o samom sustavu. Upravo takve DF dizelske-generatore (DG) koristi promatrani brod koji proizvode el. energiju za propulzijske elektro-motore („PEM“). Takav sustav se naziva dizel-električni pogon. Iskoristivost ovakvih postrojenja iznosi otprilike 40% što je i dalje manje od sporookretnih dvotaktnih motora zbog gubitaka koji se pojavljuju u pretvorbi energije te zbog manje iskoristivosti četverotaktnih srednjeokretnih motora. Na promatranom brodu instalirana su 4 generatora koji generiranu struju šalju na PEM preko visokonaponske mreže (6600V). Sustav se sastoji od 3 DG, 12 - cilindarskih motora u V izvedbi od kojih svaki stvara snagu od 11,3 MW i jednog DG, 6 - cilindarskog motora u linijskoj izvedbi snage 5,6 MW. Ovaj dizel-električni pogon pogoni brod od 97561 BRT. dužine 285,4m, putnom brzinom od 19,7 čvorova [1], [10].



Slika 1 LNG brod [2]

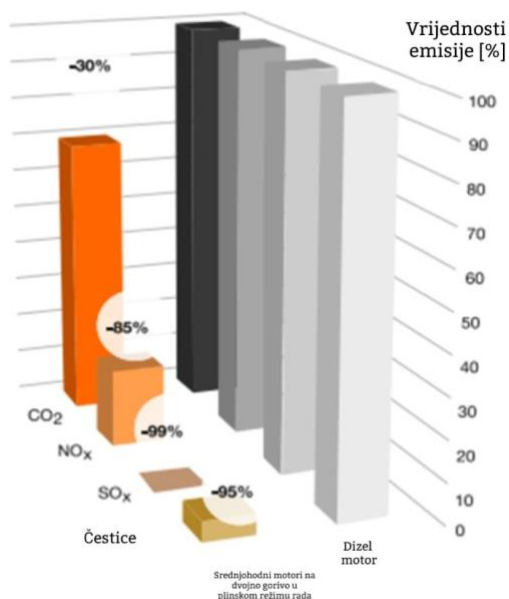




Slika 2 Razvoj pogonske propulzije LNG brodova [21]

## 2. MOTORI NA DVOJNO GORIVO

Na promatranom brodu se nalaze 4-taktni neprekretni motori s dvostrukim turbo-puhalom i među-rashladnikom. Imaju direktno ubrizgavanje dizelskog i teškog goriva (DO/HFO) i indirektno ubrizgavanje plina. Moguće je neometano prebacivanje s dizela na plin i obrnuto tijekom rada motora. Na primjer, ukoliko dođe do kvara na sustavu plina, motor se neometano prebacuje na tekuće gorivo bez ikakvih gubitaka snage ili brzine. Prilikom plovidbe na plin, emisije ispušnih plinova su smanjene za razliku od plovidbe na dizel. CO<sub>2</sub> je smanjen za 30%, NO<sub>x</sub> za 85%, a SO<sub>x</sub> je skoro pa u potpunosti uklonjen.[4] To se postiže pomoću osiromašene smjese plina i goriva,  $\lambda > 1$ , zato jer povećanje, odnosno smanjenje NO<sub>x</sub>-a ne ovisi o vrsti goriva nego isključivo o temperaturi izgaranja u cilindru, a koje se postiže povećanim pretičkom zraka, zbog disocijacije atoma kisika i dušika. Pretičak zraka ( $\lambda$ ) je omjer dovedene mase zraka i one potrebne za stehiometrijsko izgaranje. Osiromašenom smjesom se također osigurava izbjegavanje detonacijskog izgaranja u motoru. [3]



Slika 3: Smanjenje emisije ispušnih plinova prebacivanjem s dizelskog na plinski režim rada [4]

Karakteristike motora [5]:

Promjer cilindra: 460 mm,

Stapaj: 580 mm,

Broj ventila: 12

Konfiguracija cilindara: DG 1, 2 i 3 su 12V izvedbe a DG4 6L,

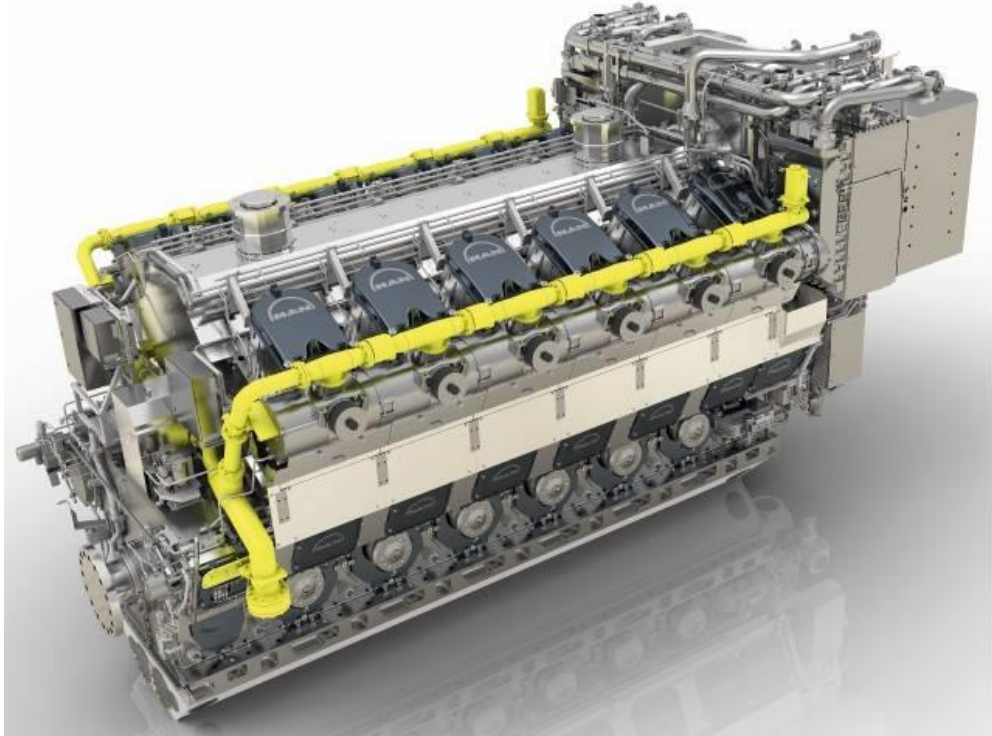
Brzina: 600 o/min,

Ovi motori mogu raditi na dizelsko gorivo, odnosno teško gorivo, a prilikom transporta UPP-a koriste ispareni metan kao pogonsko gorivo. Plin se u usisnom cijevovodu miješa sa zrakom, te smjesa ulazi u svaki cilindar preko individualnih ventila. S obzirom da metan ima visoku točku samozapaljenja koja se ne može doseći kompresijom, na sustavu goriva se nalazi pilot pumpa goriva koja pri radu motora na plin ubrizgava male količine dizelskog goriva kako bi došlo do njegovog samozapaljenja [5], [7].

Temperatura samozapaljenja goriva (Eng. “spontaneous ignition temperature”) najniža je temperatura na kojoj se gorivo zapali uz prisutnost zraka i pri odsutnosti izvora paljenja, kao što je iskra ili plamen. Temperatura samozapaljenja metana (CH<sub>4</sub>) pri atmosferskom tlaku iznosi 645°C, dok za brodska dizelska i teška goriva ta temperaturna točka se kreće od 400°C do 500°C. Pri povišenim tlakovima u cilindru temperatura samozapaljenja opada [8].

Motor ima više režima rada[5]:

- DO/HFO,
- Plin,
- Dizelski režim rada (Eng. „Backup“).



Slika 4 MAN 51/60 DF [6]

### 2.1. Dizelski režim rada

DF motori prilikom rada na tekuće gorivo ponašaju se kao klasični motori na konvencionalna goriva koji koriste visokotlačne (VT) pumpe i rasprskalice, po jedan u svakoj glavi cilindra. Međutim, za razliku od običnih dizelskih motora, ovim motorima glava cilindra osigurava smještaj za jedan veliki rasprskak u kojem se nalazi glavna sapnica i jedna manja koja služi za ubrizgavanje pilot goriva prilikom rada na plin. Ubrižgavanje pilot goriva se vrši elektronski, dok se ubrižgavanje dizelskog goriva vrši hidrauličko-mehanički. Sustav goriva se dijeli na dva sustava: sustav zajedničkog ubrižgavanja pilot goriva, i sustav ubrižgavanja DO/HFO. Neovisno na koje gorivo radi, sustav pilot goriva uvijek ubrižgava gorivo u cilindar kako ne bi došlo do začepjenja rupica na rasprskaku tijekom izgaranja te za njegovo hlađenje. Višak goriva se vraća u tank za miješanje goriva („mixing tank“) [5].

## **2.2. Režim rada u pripravnosti („Backup“)**

Ovaj režim rada treba shvatiti kao režim rada u hitnim slučajevima pri kojima motor radi na tekuće gorivo. Dok se motor nalazi u „backup“ režimu rada, operater nije u mogućnosti prebaciti rad motora na prirodni plin nego se motor najprije mora zaustaviti, a potom resetirati. Motor se prebacuje u „backup“ režim rada prilikom izbacivanja iz rada pilot pumpe. Nakon prelaska na „backup“ režim rada, sustav upravljanja motora zahtjeva od sustava upravljanja snagom (eng. „Power management system“ - PMS) rasterećenje tog dizelskog generatora. Ukoliko dođe do izbacivanja pilot pumpe, motor je potrebno u što kraćem periodu zaustaviti jer u protivnom nema hlađenja i postoji mogućnost da se zbog razlike u tlaku gorivo iz cilindra vrati u rasprskič. U oba slučaja može doći do njegovog uništavanja [5], [1].

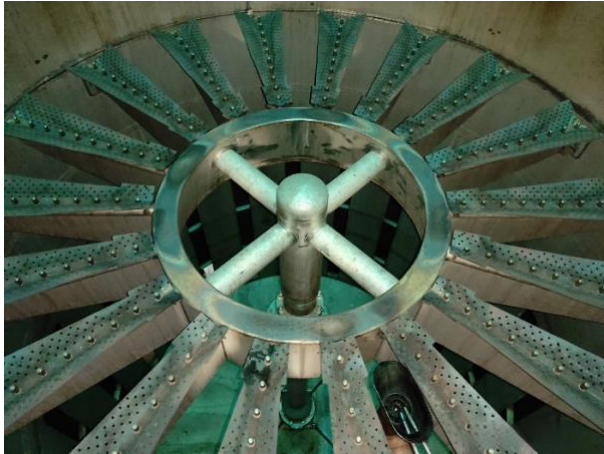
## **2.3. Sustav plina**

Prirodni plin se u brodskim tankovima nalazi u tekućoj fazi. Zbog gubitka topline kroz izolaciju u tankovima dolazi do prirodnog isparavanja. Intenzitet isparavanja ovisi o području u kojem se brod nalazi; polarno ili tropsko područje, odnosno o utjecaju vanjske temperature koja direktno utječe na isparavanje. Ispareni metan se potom koristi kao pogonsko gorivo dizelskih generatora. Metanske pare iz tanka tereta komprimiraju kompresori kroz grijač plina koji održava njegovu temperaturu na 80°C, nakon čega se plin dovodi prema dizelskim generatorima. Ukoliko DG-i ne mogu potrošiti svu količinu isparenog plina, a u svrhu zaštite tankova, višak se spaljuje kroz spaljivač plina u atmosferu (Eng. „Gas Combustion Unit“ - GCU) iz razloga što se neizgoreni metan ne smije ispuštati u atmosferu. GCU se aktivira uspoređujući potrošnju plina u motorima i dobavu plina nakon kompresora, koji tlače plin na malo iznad 5 bara. Ukoliko dođe do iznenadnog prebacivanja motora na dizel, u sustavu se naglo poveća tlak i kada tlak pređe 6 bara plin se preko mimovodnog ventila vraća u tankove jer GCU ne može reagirati na nagle promjene u dobavi plina [1].

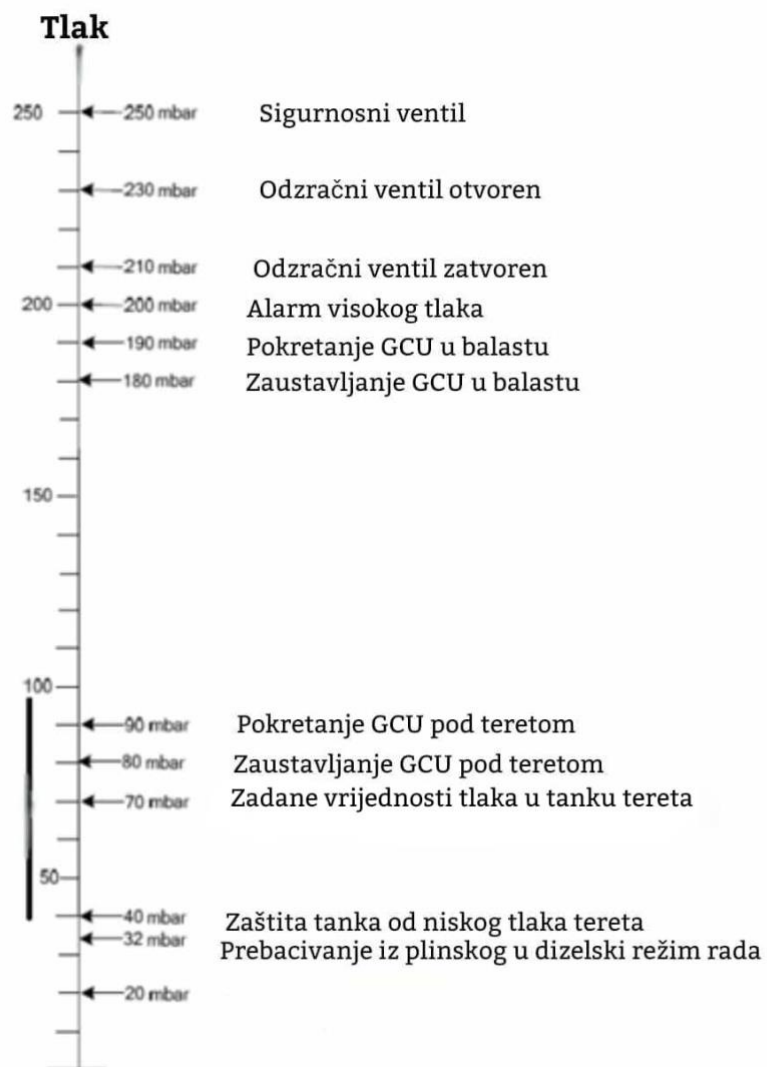
Isparavanje može biti:

- Prirodno („Natural Boil-off Gas“),
- Prisilno.

Prisilno se isparavanje vrši na način da se ukapljeni plin preko pumpe transportira do parnog isparivača. Sustav prisilnog isparavanja se aktivira kada tlak plina padne ispod 5 bara.



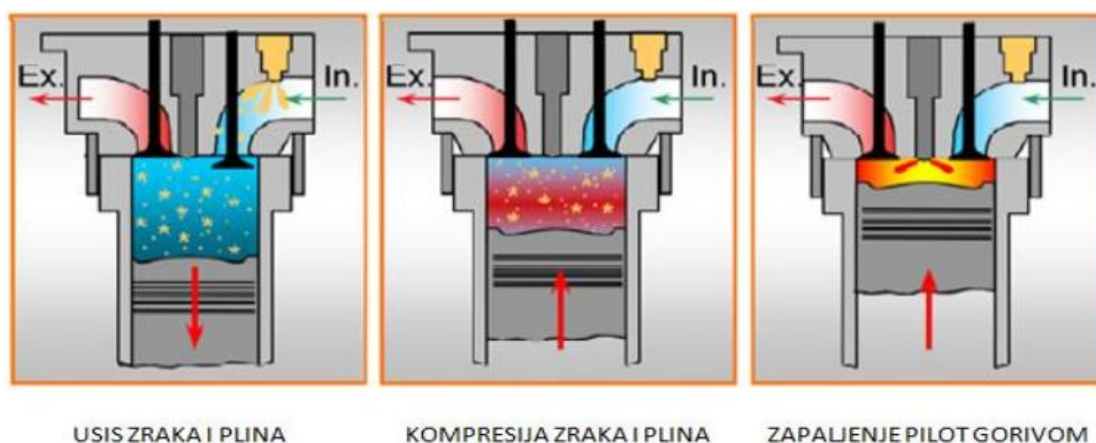
Slika 5: Gorač unutar GCU



Slika 6: Diagram kontrole nadtlaka plina u tankovima tereta [1]

### 2.3.1. Plinski režim rada

Da bi prebacivanje na plin bilo moguće, najprije ga kompresori plina moraju stlačiti na preko 5 bara. Kada se taj uvjet zadovolji, sustav upravljanja motorom omogućuje operateru da zatraži prebacivanje na plin u sustavu upravljanja plinom (Eng. „Gas Management System“, GMS). Nakon izdanog zahtjeva, automatika najprije provjerava ima li propuštanja u plinovodu. Ta provjera je bitna jer ukoliko ima propuštanja, plin može ući u strojarnicu te se pomiješati s kisikom te stvoriti eksplozivnu smjesu. Nakon provjere počinje postupno prebacivanje s tekućeg goriva na plin. To prebacivanje se vrši postepeno smanjujući dotok tekućeg goriva i povećanjem dotoka plina u cilindar. Cijeli proces prebacivanja s jedne vrste goriva na drugu obavlja se unutar 2 minute bez promjene opterećenja. Prilikom rada na plin DF motori rade po Ottovom principu jer u cilindre ulazi mješavina zraka i plina koja se stvara u usisnom cjevovodu. U svrhu smanjenja štetnosti ispušnih plinova u cilindre se ubrizgava veća količina zraka nego što je potrebna. Paljenje osiromašene smjese postiže se pomoću male količine pilot goriva. Međutim, smjesa plina i zraka ne smije biti presiromašna jer se u tom slučaju fronta plamena, samozapaljenog pilot goriva, sporo širi što rezultira smanjenom izlaznom snagom motora. Količina ubrizganog pilot goriva iznosi manje od 1% potrošnje glavnog goriva pri punom opterećenju [5], [7].



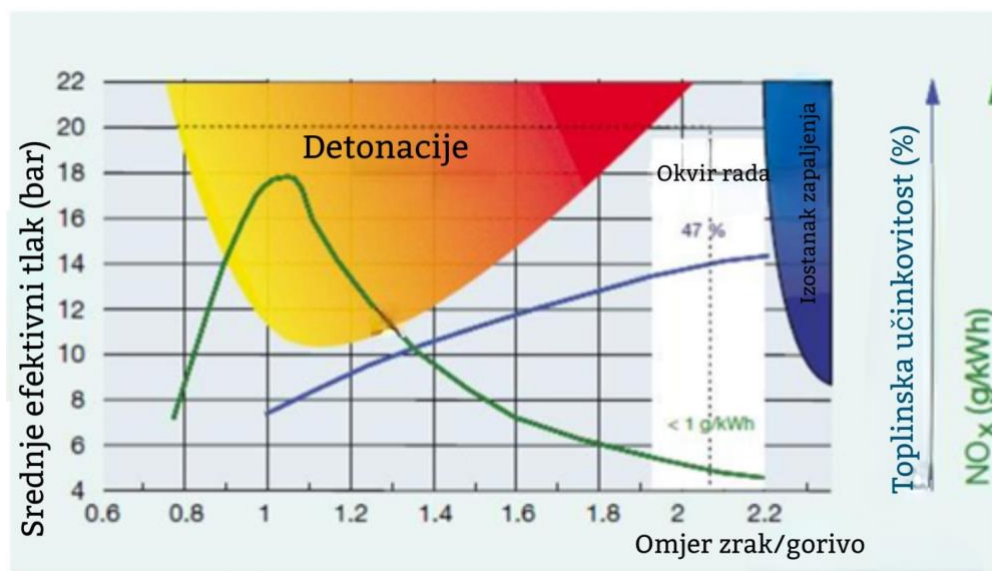
Slika 7: Plinski režim rada kod DF motora [12]

### 2.4. Detonacije u cilindru (Engl. „Knocking“)

Iz razloga što ovi motori rade po Ottovom procesu, kod njih dolazi do pojave detonacija u cilindrima. U svrhu otkrivanja detonacija, na motoru se nalaze senzori. Ti senzori rade po principu očitavanja vibracija na motoru. Međutim, detonacije je moguće predvidjeti pomoću derivacija brzine porasta tlaka u odnosu na pomak koljeničastog



vratila u otvorenom indikatorskom dijagramu ( $p/\phi$ ). Veličina i količina skokova koriste se za kvantifikaciju detonacija. Senzori nakon očitanih detonacija šalju signal u sustav upravljanja motorom (Eng. „Engine management system“, EMS). EMS nakon primitka signala smanjuje opterećenje motoru ili ga prebacuje na DO/HFO ovisno da li je došlo do pojave slabih ili snažnih detonacija. Detonacije se očituju na način da se na deriviranom dijagramu ( $dp/d\phi$ ) vidi da je porast tlaka veći od 7 bara po stupnju pomaka koljeničastog vratila. U našem slučaju detonacije se proučavaju kao odnos pretička zraka i srednjeg indiciranog tlaka. Pretičak zraka se mora držati na približno  $\lambda=2$  jer ukoliko je manji, dolazi do pojave detonacija, a ukoliko je veći, ne dolazi do zapaljenja gorive smjese. Kao što se vidi iz dijagrama na slici 8., potpuno opterećivanje motora bi se trebalo izbjegavati ako pretičak zraka ne iznosi  $\lambda=2$  [13]. Osim o pretičku zraka, detonacije ovise o temperaturama u cilindru prije i tijekom ekspanzije te o metanskom broju. Metanski broj je podatak koji označava sadržaj metana u plinu u odnosu na propan, butan i etan. Osim o pretičku zraka, opterećivanje motora ovisi i o metanskom broju jer što je on viši to je veća otpornost prema samozapaljenju [14].



Slika 8: Odnos pretička zraka i srednjeg indiciranog tlaka [13]

## 2.5. Rasprski

Kod ovih motora se nalazi jedan veliki rasprski s dvije sapnice, jedna glavna, a druga je za pilot gorivo. Glavne sapnice DO/HFO dizajnirane su tako da osiguraju potpuno opterećenje motora u režimu rada na tekuće gorivo. Kroz njih se gorivo ubrizgava samo pri radu motora na tekuće gorivo. Ipak, kako bi se osiguralo podmazivanje i hlađenje VT pumpi i rasprski i kako bi se bilo spremno za trenutno

prebacivanje motora s plinskog goriva na tekuće, gorivo mora cirkulirati kroz cijevi glavne sapnice rasprskaa i u plinskom režimu rada. Motor je opremljen s dva glavna priključka goriva, jedan za ulaz i jedan za izlaz, a oba su pod pritiskom. Potreban protok glavnog goriva na ulazu u motor jednak je 3 puta većoj potrošnji maksimalne potrošnje goriva motora. Neizgoreno gorivo cirkulirat će preko glavnog izlaza goriva natrag do vanjskog sustava goriva. Kao glavno gorivo može se koristiti teško ili lako dizelsko gorivo. U slučaju uporabe teškog goriva, ono se mora zagrijati kako bi se zadovoljila viskoznost od 11 cSt na ulazu u motor. Prilikom korištenja dizelskog goriva, gorivo nije potrebno zagrijavati zbog njegove manje gustoće i viskoznosti. Pilotske sapnice goriva dio su pilotskog sustava zajedničke sabirnice. U plinskom načinu rada ovaj se sustav koristi za paljenje plinskog goriva. One su dizajnirane za rad s vrlo malim količinama goriva kako bi se smanjila potrošnja pilot goriva. Također u načinu rada na tekuće gorivo, pilot gorivo se ubrizgava radi hlađenja pilotskih sapnica. Kao sigurnosna funkcija, u slučaju kvara na sustavu pilot goriva, motor može raditi u načinu rada tekućeg goriva bez pilotskog goriva. Bez daljnjeg pilotskog ubrizgavanja goriva, nedostaje hlađenje pilotskih mlaznica. Također niskim tlakom pilot goriva postoji opasnost da plinovi izgaranja uđu u rasprskaa zbog razlike u tlakovima. U oba slučaja rasprskaa će biti oštećen nakon nekoliko radnih sati. Zbog sigurnosnih razloga ovakav režim rada treba izbjegavati, a ukoliko je neophodan potrebno ga je što prije prekinuti [5].



Slika 9: Sapnice rasprskaa



## 2.6. Sustav plinskog goriva

Velika prednost DF motora je ta što oni mogu raditi i na plinovito i tekuće gorivo, ovisno o potražnji. Sustav dovoda plina do motora je izrađen dvostrukim cijevima koje sprječavaju curenje plina u strojarnicu u slučaju puknuća unutarnje cijevi. U plinovodu se nalazi senzor koji mjeri ugljikovodike. Ukoliko dođe do očitavanja ugljikovodika, prekida se dotok plina motoru i on se automatski prebacuje na tekuće gorivo. Dovod plina na motore je vrlo sličan sustavu goriva sa zajedničkom sabirnicom, odnosno plin ima konstanti tlak u velikoj dobavnoj cijevi iz koje ide u zasebne usisne cjevovode. Kompresori plina tlače plin na preko 5 bara, a ispod tog tlaka plina sustav upravljanja plinom ne dozvoljava prebacivanje motora na plin. U cjevovodima postoji niz regulatora tlaka koji taj tlak snižavaju do 2 bara koji je na ulazu u motor. Količina dovedenog plina ovisi o tome koliko dugo glavni solenoid ventil stoji otvoren [5], [12].

Vanjski sustav opskrbe plinom potreban je za napajanje DF motora plinom prema zahtjevima motora. Sastoji se od sustava opskrbe plinom povezanim s postrojenjem i jedinice plinskog ventila s priključnim cijevima (Eng. „Gas Valve Unit“, GVU). Sustav opskrbe plinom povezan s postrojenjem osigurava da plin s ispravnim uvjetima dolazi na ulaz u jedinicu plinskog ventila. GVU je regulacijski i sigurnosni uređaj koji omogućuje siguran rad motora u plinskom načinu rada. Jedinica je opremljena brzozatvarajućim ventilima i ventilima za odzračivanje te uređajem za regulaciju tlaka plina. Oni se nalaze na izlazu iz GVU, te prema zahtjevu prekidaju dotok plina na motor [5].

GVU ispunjava sljedeće funkcije [5]:

- Ispitivanje istjecanja plina od strane upravljačkog sustava motora prije pokretanja motora,
- Kontrola tlaka plina koji se dovodi u motor s dvojnim gorivom,
- Brzo zaustavljanje opskrbe plinom na kraju načina rada DF-a,
- Brzo zaustavljanje opskrbe plinom u slučaju zaustavljanja u nuždi,
- Propuhivanje sustava za distribuciju plina i dovodne cijevi s dušikom nakon DF rada,
- Propuhivanje dušikom iz razloga održavanja.

Kako bi se nečistoće držale podalje od upravljačke i sigurnosne opreme, nakon ventila za ručno zaustavljanje ugrađuje se plinski filter. Maksimalna širina mreže plinskog filtra mora biti 0,005 mm. Pad tlaka u filtru prati se diferencijalnim manometrom. Uređaj za kontrolu tlaka plina podešava tlak plina koji se dovodi u

motor. Kontrolni uređaji uključuju regulacijski ventil s regulatorom tlaka i pretvarače signala. U skladu s opterećenjem motora, uređaj za kontrolu tlaka održava diferencijalni tlak preko tlaka zraka prednabijanja (Eng. „Charge air“). Time se osigurava da je tlak dovoda plina ispravan na svim radnim mjestima [5].

GVU se ugrađuje u zasebnu prostoriju u kojoj se susreću sljedeći zahtjevi [5]:

- Plinski nepropusni odjeljak, ugrađuje se sustav za otkrivanje požara i gašenje požara,
- Instaliran sustav ventilacije prostorije s ventilatorom ispušnog zraka na vanjski prostor. To osigurava da je u ovoj sobi uvijek postoji niži tlak u usporedbi sa strojarnicom,
- Ugradnja sustava za detekciju plina,
- Ugradnja sustava za otkrivanje požara i gašenje požara.

Kao alternativa za instalaciju u GVU prostoriji, GVU se može opremiti s namjenskim ograđenim prostorom / kućištem. Na taj se način omogućuje ugradnja GVU izravno pored motora u prostoru strojeva. Princip sigurnosti i rada analogan je onoj u prostoriji GVU.

U ispušnom sustavu na ovim motorima nalazi se ventil za rasterećenje u slučaju eksplozije. On otvara na malo višem tlaku čime služi kao zaštita u slučaju povećanja tlaka zbog zaostalog izgaranja u ispušnom vodu.

Ventilacijski sustav koji detaljno propuhuje cijeli sustav ispušnih plinova prije starta motora je standardna oprema koja mora biti odobrena od strane klasifikacijskih društva [12].



Slika 100: GVU [15]

## 2.7. Metanski skliz

Veliki problem s kojim se bore proizvođači DF motora naziva se skliz metana (Eng. „Methan slip“). Klizanje metana je pojam kojim se opisuje kada dio neizgorenog plina, koji se sastoji pretežito od metana, izađe iz motora s ispušnim plinovima u atmosferu. Problem kod metana je taj šta on prema U.S. EPA <sup>1</sup>ima preko 25 puta veći potencijal kao staklenički plin (eng. „Greenhouse gases“, GHG potential) nego CO<sub>2</sub> [16].

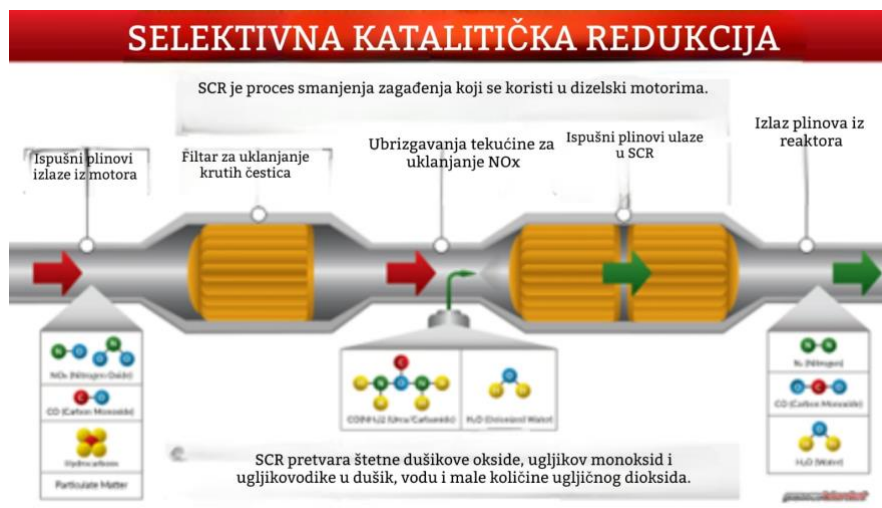
Glavni izvori neizgorenih emisija ugljikovodika u ovim vrstama motora [17]:

- Zbog pojave štetnih prostora u cilindru,
- Zbog nepotpunog izgaranja pri manjem opterećenju motora zbog hladnijih dijelova u komori (što je veće opterećenje motora to je manji skliz).

U svrhu smanjenja „klizanja“ metana proizvođači se trude pronaći tehnička rješenja. Jedno od tih rješenja bi bilo da se u 4T motore ugradi direktno ubrizgavanje koje se koristi kod 2T ME-GI motora. Iako bi klizanje bilo manje nego kod Ottovog procesa, takva investicija nije financijski isplativija. Isti efekt se može potići mijenjanjem dizajna komore izgaranja u svrhu smanjenja štetnog prostora ili ugradnjom ventila koji imaju promijenjivo vrijeme otvaranja. Kod ovih motora postoji problematika zbog povećanja NO<sub>x</sub> emisija tj., smanjenjem klizanja povećavaju se NO<sub>x</sub>. Kod motora koji imaju ugrađenu selektivnu katalitičku redukciju (SCR), namjerno se povećavaju NO<sub>x</sub>-i kako bi se smanjilo klizanje metana, a povećana NO<sub>x</sub> emisija se uklanja pomoću SCR reaktor [18].

---

<sup>1</sup> U.S. EPA - U.S. Environmental Protection Agency, agencija savezne vlade Sjedinjenih Država čija je misija zaštita zdravlja ljudi i okoliša.

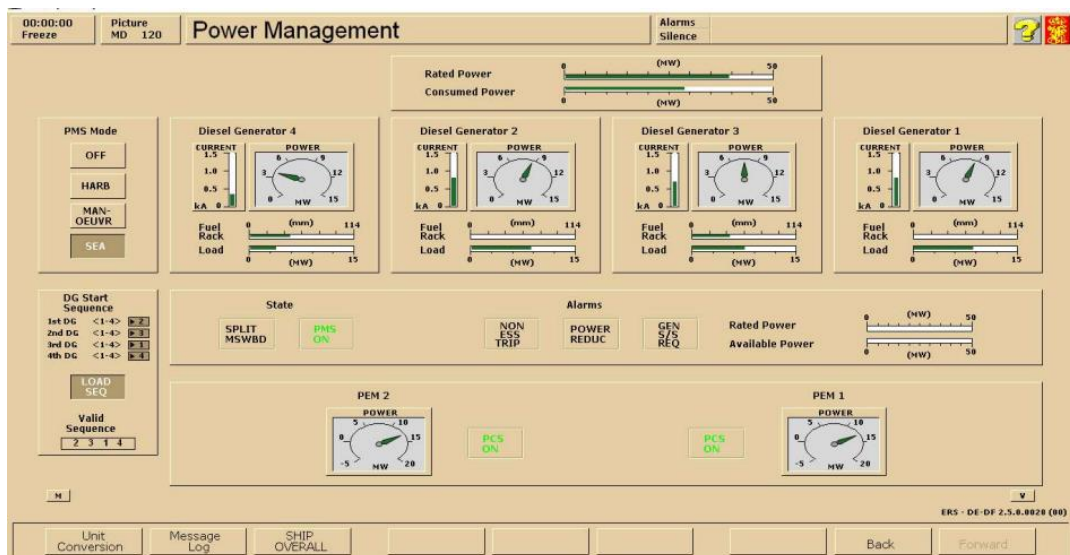


Slika 111: SCR [19]

### 3. SUSTAV UPRAVLJANJA SNAGOM

Svi generatori na brodovima moraju biti zaštićeni prema pravilima klasifikacijskih društava. Sustav upravljanja snagom (Eng. „Power Management System“, PMS) se sastoji od zaštite generatora kao što je zaštita od kratkog spoja, prekomjerne struje i povratne snage te upravljanje razdiobom radne i jalove snage. Glavne karakteristike su mu automatizacija DG, automatski povratak energije na mrežu u slučaju nestanka napajanja i automatsko smanjenje snage na pogonskim motorima zbog preopterećenja dizelskih generatora. Prilikom povećane potražnje za energijom na mreži, PMS pokreće generatore u pričuvi i stavlja ih automatski na mrežu u svrhu rasterećenja i raspodjele opterećenja. Njegova obaveza je ta da dizelski generatori ne dođu u preopterećenje. Osim upravljanja potrošnjom energije na brodu i propulzijske snage, PMS ima razne funkcije kao što su: kontroliranje potrošnje goriva i emisija ispušnih plinova, izbacivanje neophodnih potrošača ukoliko dođe do preopterećenja mreže, sigurnosno izbacivanje generatora s mreže, automatska sinkronizacija generatora, itd. Njime se može upravljati s mosta, iz kontrolne prostorije strojarnice (eng. „Engine Control Room“, ECR) i lokalnim kontrolama u samoj strojarnici/na ploči visokog napona.

PMS učinkovito regulira broj generatora na sabirnici prema promjenjivom opterećenju. Ukoliko opterećenje jednog generatora pređe 80%, automatika pokreće te stavlja na mrežu drugi generator. Također, ukoliko mu opterećenje padne ispod 25%, tada ga isključuje [1].



Slika 122: Prikaz kontrolnog panela sustava [1]

Neke od glavnih funkcija koje PMS obavlja su sljedeće [1]:

- Ubacivanje i izbacivanje generatora s mreže prema povećanju i smanjenju opterećenja,
- Postupno opterećivanje i rasterećivanje sklopova generatora kako bi se toplinska i frikcijska naprezanja svela na najmanju moguću mjeru,
- Izvođenje operacija dijeljenja opterećenja među generatorima statičko ili astatičko (ovisno o automatski ili ručno postavljenim parametrima),
- Sučelje s pogonskim upravljačkim sustavom (eng. „Propulsion Control System“, PCS) za automatsko smanjenje snage na pogonskim motorima zbog velikog opterećenja dizelskih generatora.

Broj generatora na mreži ovisi u kojem se režimu rada nalazi PMS:

- Luka - minimalni broj generatora: 1,
- More - minimalni broj generatora: 2,
- Manevriranje - minimalni broj generatora: 3.

Da bi postojala automatska redukcija snage na pogonskim elektromotorima, PMS mora biti uključen.

PMS se može aktivirati ukoliko se ispune sljedeći uvjeti:

- Dizelski motori postavljeni su na daljinsko upravljanje na lokalnoj ploči dizel motora (broj DG koji ovise o PMS načinu rada),
- Automatsko upravljanje odabrano je na ploči elektroničkog regulatora brzine,

- c) Prekidači generatora postavljeni su na daljinsko upravljanje,
- d) Generatori za hitne slučajeve su u načinu daljinskog i automatskog upravljanja,
- e) Kontrola pogona u normalnom radu (manevarski ili morski način rada).

### 3.1. Električni regulator tlaka u sustavu razdiobe energijom (Eng. „Power Management Electronic Governor“)

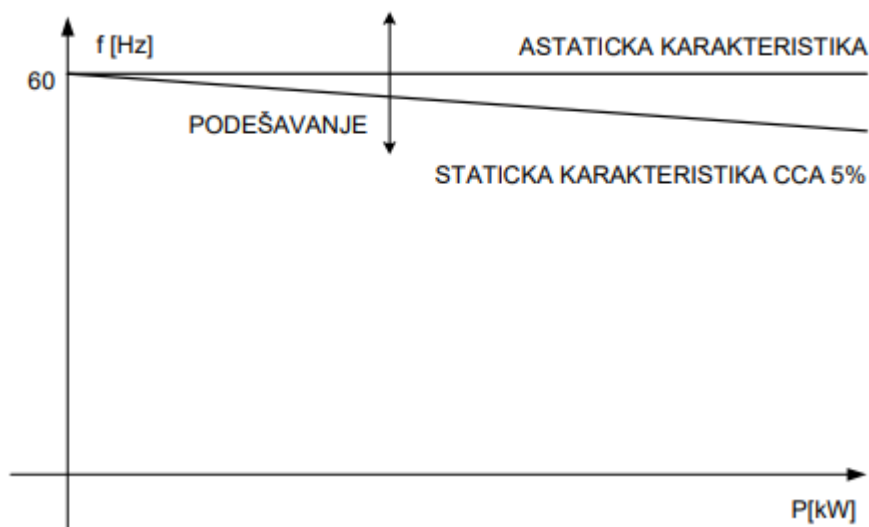
Riječ „Governor“ sama po sebi ima značenje kao uređaj koji održava brzinu vrtnje motora između krajnjih granica. Elektronički regulator brzine najčešće se koristi kod motora na plin, DF motora i kod dizelskih motora III. i IV.<sup>2</sup> kategorije iako se njegova upotreba povećava i kod motora II. kategorije. Osim kontrole brzine, elektronički regulatori imaju sljedeće namjene [12]:

- Izbjegavanje prekomjernih brzina,
- Limitiranje maksimalne dobave goriva,
- Kontroliranje maksimalne količine goriva prilikom pokretanja motora,
- U slučaju izvanrednog stanja u strojarnici gasi motor, odnosno motore ovisno o sustavu,
- Regulator broja okretaja ima mogućnost podešavanja nagiba („speed droop“) karakteristike opterećenja koja pokazuje ovisnost frekvencije o opterećenju pogonskog stroja.

Regulator održava astatičnu karakteristiku regulacije frekvencije čime se smanjuje propad frekvencije jer on puno brže kompenzira od nadređene regulacije frekvencije.

---

<sup>2</sup> Pod motore III. Kategorije spadaju 4-taktni, srednjeokretni, sa prednabijanjem, neprekretni, izvedbe u L ili V, srednjih snaga od 1500 kW do 25 000 kW  
Pod motore IV kategorije spadaju 2-taktni, sporookretni, sa prednabijanjem, prekretni, uvijek L izvedba, velikih snaga od 3000 kW do 100 000 kW [22]



Slika 133: Prikaz ovisnosti frekvencije o snazi – razlika statičke i astatičke regulacije [20]

Na ovom primjeru broda, regulator ima nekoliko funkcija [1]:

1. „Run-Up“ program

Kako bi se izbjegla mehanička i toplinska naprezanja DG prilikom starta nezagrijanog motora, PMS izvodi postepeno pokretanje motora koje se sastoji od praznog hoda u kojem motor vrti 300 o/min prvih 30 s, nakon čega se postepeno diže brzina do nazivne.

Međutim, unatoč automatici preporuča se ručno stavljanje motora u „slow turning<sup>3</sup>“ kako bi se izbjegli mehanički kvarovi.

2. „Speed Sensing“

Regulator brzine očitava brzinu na zamašnjaku motora.

3. „Speed Governing“

Regulator brzine će automatski prilagoditi brzinu uspoređujući mjerenje brzine s ulaznim podacima.

4. „Synchronising and control of generator breakers“

Elektronički upravljački sustav provodi automatsku sinkronizaciju i zatvaranje DG prekidača.

5. „Load sensing“

---

<sup>3</sup> Slow turning – mehanizam za sporo okretanje motora

Specifično opterećenje generatora (vlastito opterećenje) i srednje opterećenje generatora ulaze u elektronički regulator.

#### 6. „Load Sharing“

Dijeljenje opterećenja provodi se odjednom kada su prekidači spojeni (u slučaju da je automatski način rada aktivan).

#### 7. „Soft Loading/Unloading“

Postepeno opterećenje koristi se kako bi se izbjeglo mehaničko naprezanje dizelskih motora. Logika postepenog opterećenja/rasterećenja aktivna je samo u AUTO načinu rada.

Kada je ulazni generator pokrenut i spojen, radi bez opterećenja. Sustav raspodijele opterećenja počinje raditi, postupno podižući letvu goriva kontroliranom brzinom dok se ne postigne ravnoteža (otprilike 5 minuta, 1 minuta do 50% i 4 minute do 100%).

#### 8. „Dead-bus detection and sequence“

Kada elektronički upravljački sustav osjeti "mrtvu sabirnicu" – sabirnicu bez napona, odnosno kada dođe do nestanka napajanja, i „run-up“ program i „soft loading“ se zaobilaze. DG će odmah preuzeti postojeće opterećenje.

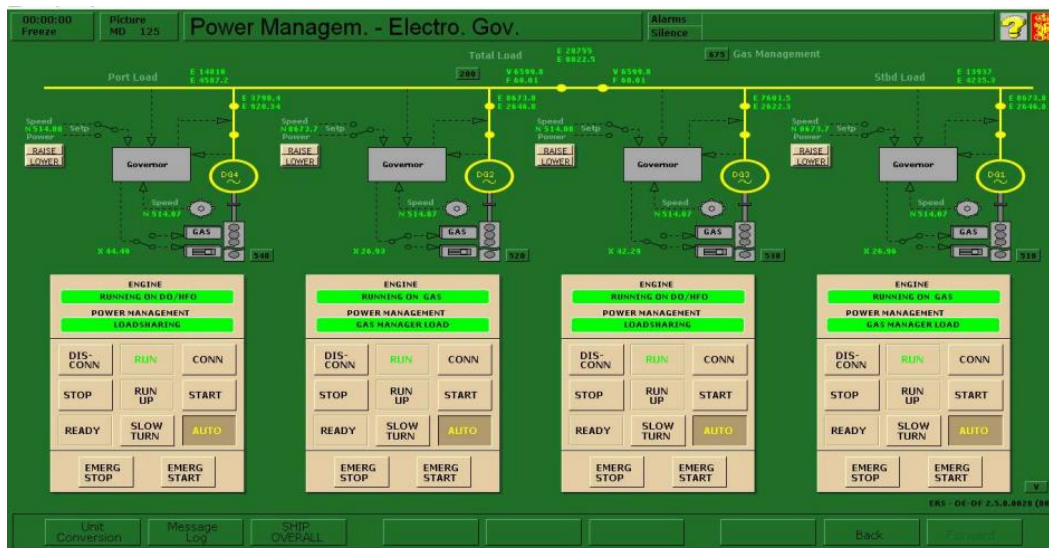
#### 9. „Auto mode“

Kada se dizelski generator prebaci na automatski rad, cijeli se sustav prebaci na automatski rad, odnosno primjenjuju se do sada svi opisani postupci. Da bi se dizelski generator mogao prebaciti na automatski rad potrebno je zadovoljiti slijedeće uvijete [1]:

- Prekidači generatora na centrali od 6,6 kV namješteni na daljinsko upravljanje,
- Dovoljan uputni tlak zraka,
- Pumpa za predpodmazivanje namještena na automatskom režimu,
- Ventili za gorivo i ulje su otvoreni,
- Pumpe goriva rade ili su postavljene na daljinsko upravljanje i automatski režim,
- Ventili za rashladnu vodu su otvoreni,
- Rashladne pumpe slatke vode rade ili su pumpe postavljene na daljinski i automatski režim,
- Visoko-temperaturni krug slatke vode dizelskih generatora je iznad  $>75^{\circ}\text{C}$ ,
- Alarmi na motoru su resetirani,
- DG je na daljinskom upravljanju.



Ukoliko se odabere Automatski režim rada, tada automatika preuzima rad nad sustavom pokretanja DG te njegovog stavljanja na mrežu. Ukoliko je DG na ručnom režimu rada umjesto na automatskom, on ne može vršiti razdiobu energije isto kao što se ne može automatski uključiti/isključiti s mreže.



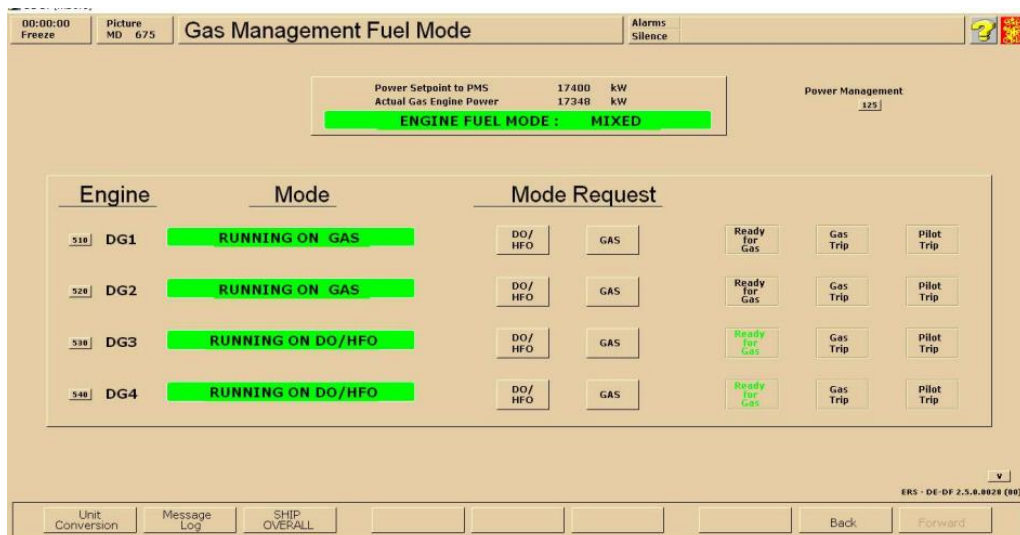
Slika 144: Prikaz upravljanja opterećenjem [1]

### 3.2. Sustav upravljanja plinom (GMS)

Sustav upravljanja plinom je sustav na kojem operater može odabrati način rada s plinom ili tekućim gorivom. Glavni zadaci sustava upravljanja plinom su [1]:

1. Kontrola tlaka u spremniku,
2. Kontrola načina rada goriva,
3. Kontrola opskrbe gorivom za DF motore prema potražnji,
4. Kontrola opskrbe gorivom za GCU prema tlaku spremnika,
5. Kontrola odzračivanja.

GMS daje zadanu snagu PMS-u u kW. Ona ovisi o količini isparenog metana u tankovima i proračunata je tako da daje optimalnu snagu generatora sa stajališta ekonomičnosti. Također se prikazuje stvarna snaga koju DG pogonjeni na plin proizvode.



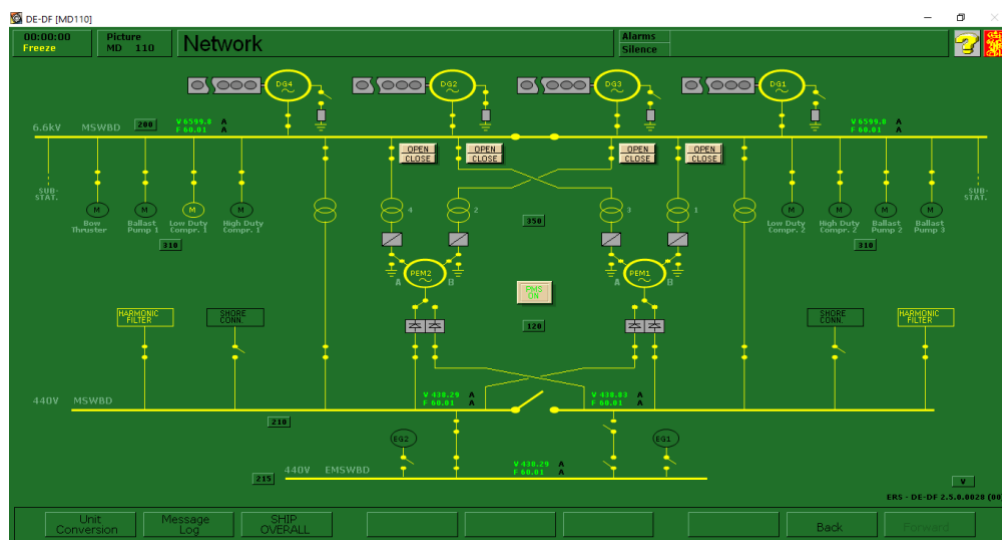
Slika 155: Sustav upravljanja plinom [1]

Kako bi PMS mogao optimalno raspodjeljivati opterećenje postoje 3 režima rada [1]:

- „DO/HFO Mode“ - u ovom režimu rada svi motori rade na dizel/teško gorivo, a opterećenje je simetrično raspoređeno među njima. Ukoliko operator zahtjeva, razdioba opterećenja se može podesiti tako da se dijeli asimetrično,
- „Mixed Mode“ – u ovom režimu rada barem jedan generator radi na plin, a jedan na DO/HFO. Motor na plin se optereti onoliko koliko mu omogućuje raspoloživa količina isparenog plina u tanku. Preostali motori koji rade na dizel uzimaju preostalo opterećenje. Ukoliko motor na plin radi duže od 3 minute na manje od 15% opterećenja, on se automatski prebacuje na DO/HFO,
- „Gas only mode“ – u ovom slučaju svi motori rade na plin. Opterećenje je simetrično raspoređeno, međutim, operator može odabrati bilo kakvu vrstu razdiobe opterećenja.

### 3.3. Automatski povratak energije na mrežu

Jedno od glavnih svojstava PMS-a je automatska uspostava pogona nakon nestanka električne energije (eng. "blackout") (eng. „Automatic Power Restoration“). Ukoliko dođe do „blackout“-a, dizelski-generatori, propulzija broda, transformatori i svi prekidači potrošača će se izbaciti s mreže. Doći će do izbacivanja prekidača između ploče za rad u nuždi (eng. „Emergency bus-bar“) i 440V ploče. Ostanak ploče za rad u nuždi bez napajanja, detektira automatika generatora za rad u nuždi (eng. „emergency generator“, EG), te se automatski pokreće i spaja na ploču za rad u nuždi. Za razliku od glavnih generatora on ima poseban tank goriva i sustav upućivanja koji je najčešće pomoću elektro-pokretača, a može biti i ručni, s priviješenim pumpama koje ne zahtijevaju napajanje s ploče. U trenutku kada se EG spoji na ploču dolazi do trenutnog napajanja neophodnih potrošača kao što su rasvjeta u nuždi, komunikacija, sustav za protupožarnu zaštitu, itd., dok će pumpa za podmazivanje dizelskih generatora započeti s radom nešto kasnije. Prekidač koji je namijenjen za uključivanje, prilikom blackouta će se uključiti i ponovno spojiti ploču za rad u nuždi s 440V pločom. Kada je 440V ploča snabdijevana, početi će startati pumpe i ventilatori za podmazivanje i hlađenje PEM i DG. Prvi DG koji se nalazi u pričuvi će se pokrenuti te će se automatski spojiti na visokonaponsku ploču. Nakon toga se visokonaponska ploča spaja preko transformatora na 440V ploču, a ona se sinkronizira s pločom za rad u nuždi. Kada dođe do njihove sinkronizacije EG se izbacuje s ploče te se gasi. Nakon šta je zahtijevani broj generatora na mreži, ovisno o režimu rada PMS-a, PEM su spremni za rad [1].



Slika 166: Shema električnog sustava na brodu [1]

### **3.4. Upravljanje propulzijskim elektromotorima**

Na ovom brodu sustav napajanja PEM-a se može podijeliti na 4 glavna dijela [1]:

- Pozicija poluge upravljanja broda,
- Regulator broja okretaja,
- Transformator i statički pretvarači,
- Propulzijski elektro-motori (eng., „PEM“) i uzbuda.

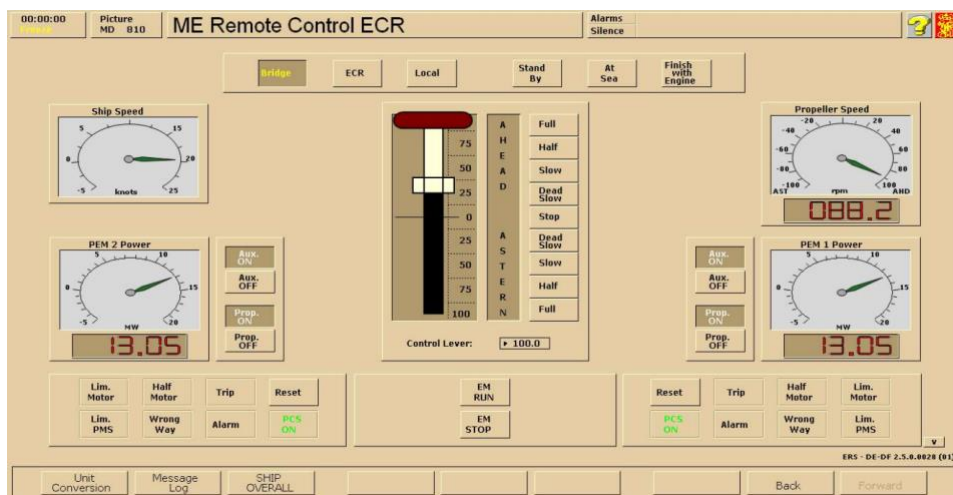
Propulzijskim elektro-motorima se može upravljati sa zapovjedničkog mosta, iz kontrolne prostorije strojarnice i lokalno u prostoriji razvodne ploče napona 6,6 kV.

#### **3.4.1. Upravljanje brzinom**

Signal za regulaciju brzine koji dobiva regulator broja okretaja ovisi o poluzi za kontrolu brzine. Da bi se omogućila osjetljiva regulacija na niskim brzinama, regulator uključuje pojačalo s dvije postavke pojačanja; za male brzine i za velike brzine. Graničnik ubrzanja/kočenja ugrađen je u regulator i on je neovisan o brzini kretanja poluge za kontrolu brzine. Regulator brzine uspoređuje naredbu brzine sa stvarnom brzinom. Izlaz regulatora služi za povećanje ili smanjenje struje do PEM-a dok odstupanje ne bude nula. Izlaz iz regulatora brzine ograničen je raspoloživom snagom, maksimalnom strujom statora, i parametrom koji definira maksimalnu pogonsku snagu. Izlazni signal iz regulatora brzine, kojem je referenca struja, prenosi se na regulator struje koji uspoređuje stvarnu struju sa strujnim referentnim signalom i održava struju potrebnu za stvarnu potražnju za brzinom. Regulator brzine kontrolira oba pretvarača na istoj liniji osovine tako da oba namota dijele snagu podjednako.

#### **3.4.2. Uređaj za sinkronizaciju faza**

Uređaj za sinkronizaciju faza služi za sinkroniziranje brzina porivnih elektromotora. Kada je aktiviran mjeri brzinu oba elektromotora. Ukoliko je razlika u njihovoj brzini veća od zadane tada dolazi do njihove sinkronizacije čime na upravljačkoj ploči zasvjetli zeleno. Brzine se izjednačavaju slanjem signala za izjednačavanjem referenci brzine.



Slika 177: Kontrolna prostorija strojarnice-daljinsko upravljanje porivnim motorima [1]

### 3.4.3. Statički pretvarači frekvencije

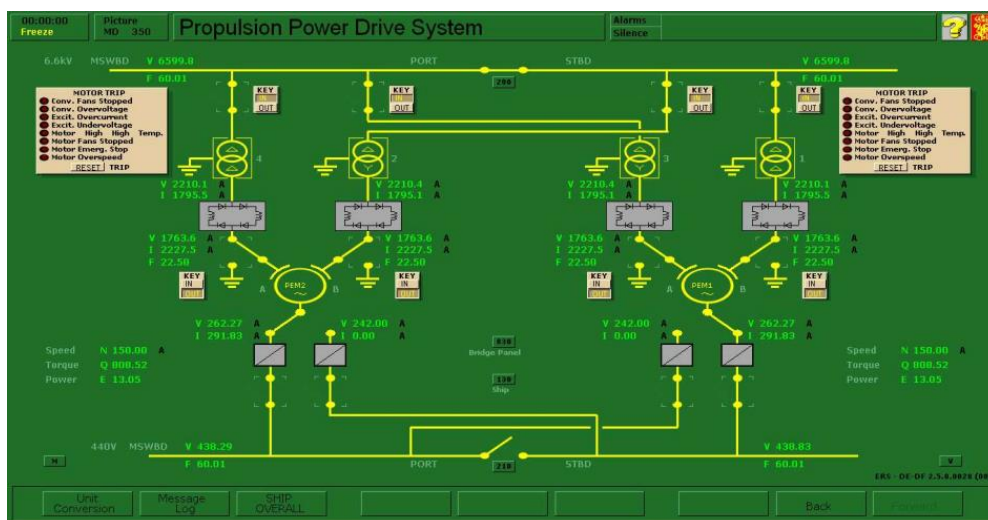
Statički pretvarači frekvencije imaju 5 glavnih funkcija [1]:

- Pokretanje i zaustavljanje PEM-a,
- Ubrzati i usporiti PEM na željenu brzinu,
- Regulirati radnu brzinu PEM-a regulacijom izlazne frekvencije,
- Za preokretanje smjera motora kada je to potrebno,
- Zaustavljanje broda vožnjom svom snagom krmom.

Pretvarači su dvanaest-impulsnog tipa, a sastoje se od dva sinkro-pretvarača sa šest impulsa. Maksimalna električna frekvencija, a time i brzina, iznosi 21,75 Hz, odnosno 145 o/min. Svaki pretvarač se sastoji od mrežnog mosta, istosmjernog reaktora i strojnog mosta. U stanju „naprijed“, mrežni most radi kao kontrolirani ispravljač, a strojni most kao kontrolirani pretvarač. Kada je potrebno kočenje osovine, uloge mosta su obrnute [1].

### 3.4.4. Pogonski elektromotori i pobuda

Postoje dva PEM-a spojena na jednu osovinu propelera. To je sinkroni motor od 18 polova, koji se snabdijeva do 2200 V promjenjive frekvencije. PEM ima dva odvojena namota koja se napajaju putem zasebnih pretvarača. Svaka polovica doprinosi polovici ukupnog zakretnog momenta, troši polovicu ukupne snage i troši polovicu ukupne struje. Svaki PEM opremljen je s dva DC sustava uzbude bez četkica, od kojih se svaki snabdijeva s 440V A/C. Jedno snabdijevanje je u funkciji dok je drugo u pripravnosti. Jedna uzbuda napaja oba polu-motora.



Slika 188: Snabdijevanje propulzijskih elektro-motora energijom [1]

### 3.4.5. Minimalno opterećenje – zaustavljanje broda vožnjom svom snagom krmom

Kako bi se izbjegla povratna snaga na dizelskim generatorima, odnosno da ne bi postali potrošači (el. motori), pri usporavanju plovila vožnjom svom snagom krmom (eng. „Crash stopping“), PMS uzima u obzir najmanje opterećen DG i održava njegovo opterećenje iznad 500 kW. Ova funkcija ograničava količinu kočenja koja se može primijeniti.

PMS registrira "Crash stop" kada je [1]:

- Neto snaga na obje osovine negativna,
- Poluga za kontrolu brzine broda postavljena za vožnju krmom, a osovina se okreće prema naprijed.

## 4. ZAKLJUČAK

Od samih početaka motora teži se optimalnom kružnom procesu, traže se novi materijali i vrste izrade koje bi učinile motore što lakšim i otpornijim na trošenje, te načini za postizanje što veće snage uz manju potrošnju goriva i smanjenju emisija u ispušnim plinovima. Iz tih se razloga sve više povećava interes za alternativna goriva kao što je prirodni plin. DF motori su se pokazali dobri i pouzdani motori s niskim emisijama. S gledišta ekonomičnosti ti motori, kod LNG brodova, imaju veću fleksibilnost u smislu prilagodbe u ovisnosti o isparavanju tereta jer dok je brod pun tereta koriste prirodno ispareni teret koji bi se inače spaljivao i ispuštao u atmosferu kroz GCU, a kad je prazan rade na konvencionalno gorivo.

Kod ovih motora postoji mogućnost poboljšanja kao što je povećanje izlazne snage, performansi i smanjenju potrošnje goriva te naravno smanjenju emisija plinova. Nedostatak kod ovih motora je taj što pri malom opterećenju imaju puno niži stupanj iskoristivosti od konvencionalnih motora.

U eksploataciji je primjetno da DF motori imaju problem sa sklizom metana te s detonacijama u cilindru zbog čega se ne mogu postizati veći kompresijski omjeri. Na slici 2 prikazan je razvioj propulzije na LNG brodovima. U samim počecima LNG brodova, zbog svoje sigurnosti i snage se koristila parna turbina koja se i dalje može pronaći na pojedinim brodovima. Međutim, zbog niske iskoristivosti parnih turbina počelo se prelaziti na sporookretne 2T dizelske motore. Takvi motori imaju najveću iskoristivost od svih današnjih sustava koja iznosi preko 50%. Međutim, u svrhu potpunog iskorištavanja metana koji prirodnom putem ispari, na LNG brodove su se počeli ugrađivati DFDE sustavi koji su efikasniji i fleksibilniji od motora na konvencionalno gorivo. Kao što je u radu navedeno ovo su 4-taktni motori koji imaju svoje prednosti, ali i nedostatke. Kako je tehnologija napredovala tako su se poboljšavali motori čime su se počeli ugrađivati 2-taktni veliki motori na dvojno gorivo s direktnim prijenosom na propellersku osovinu. To je najnoviji i najefikasniji sustav koji se počeo razvijati u posljednjih 10-tak godina.

## LITERATURA

- [1] Leif P. Halvorsen, 2012, Neptune ERS Diesel Electric Dual Fuel Machinery & Operation (srce.hr)
- [2] Nozaki T. 2017, „Kawasaki’s Liquefied Natural Gas (LNG) Carriers Packed with Innovations to Accommodate the World’s Energy Supply Needs“, Kawasaki’s Liquefied Natural Gas (LNG) Carriers Packed with Innovations to Accommodate the World’s Energy Supply Needs | ANSWERS | Kawasaki’s Solutions for the Future | Kawasaki Heavy Industries (khi.co.jp)
- [3] Mencer M., 2012., magistarski rad, “Prednosti prirodnog plina kao pogonskog energenta brodskih postrojenja”
- [4] 2017 Wärtsilä Corporation, www.wartsila.com
- [5] MAN 49/60DF, 2022, Marine Four-stroke dual fuel engine, man-49-60df-imo-tier-iii-marine (3).pdf
- [6] 2023 Maritime Activity Reports, Inc., MAN recorded multiple cruise orders (marinelink.com)
- [7] Vaasa, November 2019, Wärtsilä 46DF Product Guide (wartsila.com)
- [8] Lenac D. „Goriva, maziva i voda“, prezentacija
- [9] Dvornik J., Dvornik S., “Dual-Fuel-Electric Propulsion Machinery Concept on LNG Carriers”, TOMS\_VI.indd (srce.hr)
- [10] LNG for transport | Shell Global
- [11] Luzer J. i Spinčić A., 2013., Enciklopedijski brodstrojarski riječnik, Grafički zavod Hrvatske
- [12] Kuiken K., 2016., “Gas and Dual-fuel engines”
- [13] Vulić J., 2018., završni rad, „Dual fuel motori“, <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:164:770974>
- [14] Palmer G., 2017., „Methane number“, Methane Number (degruyter.com)
- [15] 2020 KÜHME Armaturen GmbH, Gas Valve Unit · KÜHME Armaturen (kuehme.de)



- [16] U.S. EPA, „Importance of Methane“, [Importance of Methane | US EPA](#)
- [17] Bass C., 2023., How to be smarter about methane slip – right now (wartsila.com)
- [18] Sachgau O., Can methane slip be controlled (man-es.com)
- [19] Pacanowsky A., „WHAT IS SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION?“, [What is Selective Catalytic Reduction? - Powerblanket](#)
- [20] Vučetić D., 2015., BEUS\_B\_Vucetic\_skripta (srce.hr)
- [21] [Innovation of LNG Carrier-Propulsion and BOG handling technology \(LNG Warring State Period\) \(slideshare.net\)](#)
- [22] Kuiken k. 2017., „Diesel engine 1“

## POPIS SLIKA

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1 LNG brod [2].....                                                                             | 1  |
| Slika 2 Razvoj pogonske propulzije LNG brodova [22].....                                              | 2  |
| Slika 3: Smanjenje emisije ispušnih plinova prebacivanjem s dizelskog na plinski režim rada [4] ..... | 3  |
| Slika 4 MAN 51/60 DF [6].....                                                                         | 4  |
| Slika 5: Gorač unutar GCU [23].....                                                                   | 6  |
| Slika 6: Diagram kontrole nadtlaka plina u tankovima tereta [1].....                                  | 6  |
| Slika 7: Plinski režim rada kod DF motora [12] .....                                                  | 7  |
| Slika 8: Odnos pretička zraka i srednjeg indiciranog tlaka [13] .....                                 | 8  |
| Slika 9: Sapnice rasprskavača [23] .....                                                              | 9  |
| Slika 10: GVU [15] .....                                                                              | 11 |
| Slika 11: SCR [19] .....                                                                              | 13 |
| Slika 12:Prikaz kontrolnog panela sustava [1] .....                                                   | 14 |
| Slika 13: Prikaz ovisnosti frekvencije o snazi – razlika statičke i astatičke regulacije [20]<br>16   |    |
| Slika 14: Prikaz upravljanja opterećenjem [1] .....                                                   | 18 |
| Slika 15: Sustav upravljanja plinom [1] .....                                                         | 19 |
| Slika 16: Shema električnog sustava na brodu [1] .....                                                | 20 |
| Slika 17: Kontrolna prostorija strojnice-daljinsko upravljanje porivnim motorima [1] .                | 22 |
| Slika 18: Snabdijevanje propulzijskih elektro-motora energijom [1] .....                              | 23 |