

# Nove tehnologije za povećanje efikasnosti broda

---

**Bilandžić, Dino**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:655404>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-22**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split -  
Repository - Faculty of Maritime Studies Split for  
permanent storage and preservation of digital  
resources of the institution](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET**

**DINO BILANDŽIĆ**

**NOVE TEHNOLOGIJE ZA POVEĆANJE  
EFIKASNOSTI BRODA**

**DIPLOMSKI RAD**

**SPLIT, 2019.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET**

**STUDIJ: BRODOSTROJARSTVO**

**NOVE TEHNOLOGIJE ZA POVEĆANJE  
EFIKASNOSTI BRODA**

**DIPLOMSKI RAD**

**MENTOR:**

**Prof.dr.sc. Gojmir Radica**

**STUDENT:**

**Dino Bilandžić (MB:0171259182)**

**SPLIT, 2019.**

## SAŽETAK

Nove tehnologije koje se uvode radi povećanja učinkovitosti se postavljaju na suvremene brodove kako bi došlo do što veće iskoristivosti pojedinog broskog sustava. U ovom radu opisan je sustav dizel električne propulzije te ujedno i sustav dvojnog goriva. Također je opisan sustav propulzije Azipod te njegovi djelovi i sustavi. U posljednjem dijelu rada opisan je projektni indeks energetske učinkovitosti broda (EEDI) te je napravljen proračun i ocjena energetske učinkovitosti broda West Bergen.

**Ključne riječi:** Nove tehnologije, broski sustav, propulzija, učinkovitost

## ABSTRACT

New technologies introduced to ships to increase efficiency are being set up to modern ships in order to make the most usable of a particular ship system. In this paper is described the diesel electrical propulsion system and also the dual fuel system. The propulsion system Azipod and its components and systems are also described. In the last part of the work, the project's Energy Efficiency Index (EEDI) is described and a budget and energy efficiency assessment of West Bergen was made.

**Key words:** New technology, ship system, propulsion, efficiency

## SADRŽAJ

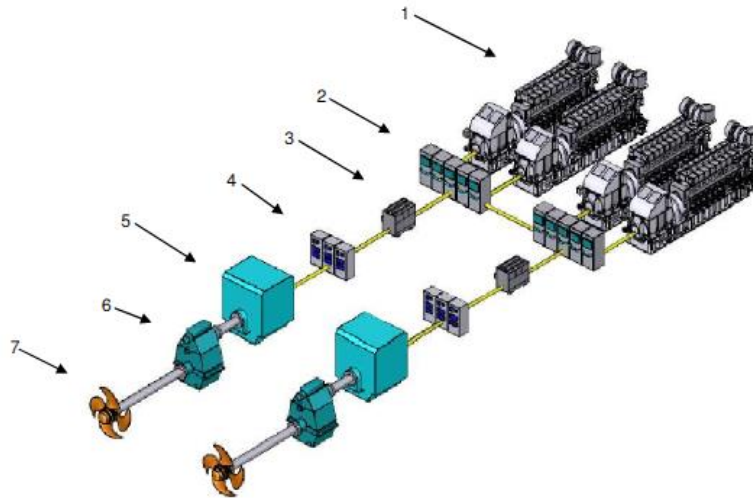
1. UVOD.....	1
2. DIZEL – ELEKTRIČNA PROPULZIJA NA BRODOVIMA.....	2
2.1. PREDNOSTI DIZEL ELEKTRIČNE - PROPULZIJE .....	3
2.2. OSNOVNI ELEMENTI DIZEL ELEKTRIČNOG POSTROJENJA.....	5
2.3. UPRAVLJANJE POGONOM.....	7
2.4. ODABIR MOTORA .....	9
2.5. PREKRET MOTORA I REGENERACIJA.....	10
3. MOTORI NA DVOJNO GORIVO.....	12
3.1. WÄRTSILÄ 50DF POGONSKI MOTORI.....	13
3.1.1. SUSTAV GORIVA.....	14
3.1.2. SUSTAVI ZA PODMAZIVANJE I HLAĐENJE MOTORA.....	17
3.1.3. SUSTAV TURBOPUHALA .....	17
3.1.4. OPTEREĆENJE I MAKSIMALNA IZLAZNA SNAGA MOTORA .....	18
3.2. USPOREDBA EMISIJA ISPUŠNIH PLINOVA KOD MOTORA NA DVOJNO GORIVO I DIZELSKIH MOTORA.....	20
3.3. Wärtsilä RT- FLEX 50DF 2 – TAKTNI MOTOR S NISKOTLAČNIM SUSTAVOM DOBAVE .....	21
3.3.1. SPECIFIČNA POTROŠNJA GORIVA .....	22
3.3.2. PODMAZIVANJE CILINDRA.....	22
4. AZIPOD SUSUTAV PROPULZIJE.....	22
4.1. OSNOVE AZIPOD TEHNOLOGIJE.....	25
4.2. DIJELOVI AZIPOD SUSTAVA .....	27
4.2.1. UNUTRAŠNJI AZIPOD SUSTAV.....	27
4.2.2. VANJSKI AZIPOD SUSTAV .....	29
4.3. RADOVI UNUTAR AZIPOD-A.....	34
4.4. PROTUPOŽARNI SUSTAVI.....	36
5. PROJEKTI INDEKS ENERGETSKE UČINKOVITOSTI BRODA (EEDI) .....	37

<b>5.1. PRISTUP OCJENI ENERGESKE UČINKOVITOSTI – EEDI .....</b>	<b>38</b>
<b>5.2. OCJENA ENERGETSKE UČINKOVITOSTI BRODA WESTERN BERGEN.....</b>	<b>39</b>
<b>5.2.1. OPĆE ZNAČAJKE MOTORNOG BRODA WESTERN BERGEN .....</b>	<b>41</b>
<b>5.3. PRORAČUN EEDI-A .....</b>	<b>44</b>
<b>5.4. IZRAČUN EEDI-A.....</b>	<b>48</b>
<b>6. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>49</b>
<b>LITERATURA: .....</b>	<b>50</b>
<b>POPIS TABLICA: .....</b>	<b>51</b>
<b>POPIS SLIKA: .....</b>	<b>52</b>

## 1.UVOD

Glavna zadaća broda kao plovnog sredstva je da svojom konstrukcijom i veličinom osigurava nesmetan i siguran prijevoz ljudi i dobara. Svi brodovi imaju konstrukcijski oblik koji im osigurava potreban uzgon za plutanje na vodi. U današnjem vremenu brod se određuje kao visoko informatizirani i automatizirani tehnički sustav visoke kapitalne vrijednosti, koji zbog specifičnosti uslijed njegovog korištenja podliježe veoma strogim standardima kvalitete i sigurnosti. Brod je jedan od najidealnijih i najsloženijih sredstava prijevoza, kojim se odvija preko dvije trećine svjetske trgovine. Njegove forme i funkcija predmet su stalnog usavršavanja a suvremena tehnologija omogućuje gradnju većih, bržih, kompleksnijih i kvalitetnijih brodova. Upravo zbog postizanja veće iskoristivosti susrećemo suvremena rješenja koja omogućuju povećanje brzine broda, sigurnost plovidbe te smanjenje troškova prijevoza. Ono što uz konstrukcijske i propulzijske karakteristike dodatno definira uvođenje novih tehnologija je svakako navigacijska i sigurnosna oprema broda, mogućnost korištenja obnovljivih izvora energije(sunca, vode i vjetra) za propulziju broda ali i za osnovne životne potrebe posade, te mogućnost spajanja jednog takvog plovnog objekta u pametan i u što većoj mjeri samodostatan sustav koji će maksimalno služiti svojoj namjeni u kojem god obliku bila predviđena njegova svrha. U prvom dijelu ovog rada opisana je dizel-električna propulzija na brodovima te njeni osnovni elementi. U drugom dijelu opisani su načini rada motora na dvojno gorivo sa pripadajućim sustavima. U trećem dijelu ovog rada opisan je sustav propulzije Azipod te njegovi dijelovi i sustavi. U posljednjem dijelu rada opisan je projektni indeks energetske učinkovitosti broda (EEDI) te je napravljen proračun i ocjena energetske učinkovitosti broda West Bergen.

## 2. DIZEL –ELEKTRIČNA PROPULZIJA NA BRODOVIMA



**Slika 1: Sastavne komponente dizel električne propulzije [1]**

1. Gensetovi: Dizel motori i generatori; 2. Glavne razvodne kutije; 3. Opskrbni transformatori - Ovisno o vrsti pretvarača. Nije potrebno ukoliko se koristi frekventni pretvarač sa sinusoidalnim pogonom; 4. Frekvencijski pretvarači; 5. Električni propulzijski motori; 6. Mjenjačke kutije ; 7. Propeleri

Najosnovniji elementi sustava dizel električne propulzije su dizel generatori, frekvencijski pretvarači, transformatori, prigušnice, kondenzatori i propulzijski motori. Proizvodnja električne energije ostvaruje se preko trofaznih sinkronih generatora velikih snaga pogonjeni srednjohodnim, brzohodnim motorima ili sa turbinama pri konstantnom broju okretaja. Promjenom opterećenje generatora mijenjaju se frekvencija i napon, a motori se opremaju regulatorima broja okretaja čija se uzbuda vrši automatskim regulatorima napona (AVR- Automatic Voltage Regulator). U paralelnom radu generatora regulator broja okretaja i automatski regulator napona imaju važnu ulogu.

Za ispravljanje i prilagodbu napona koriste se transformatori, te također za prilagodbu faza (zvijezda – zvijezda i zvijezda – trokut) kako bi se smanjila harmonička izobličenja napona, koristeći svoju induktivnu karakteristiku, izvedba statora propulzijskih motora je pomaknuta za  $30^\circ$ . Prigušnice i kondenzatori spajaju se u serije ili paralele te ovisno o dizajnu i pripadajućim karakteristikama poništavaju se smetnje,



uz poneki dodani otpornik koji ograničava vršne vrijednosti napona. Ovakav sustav problem svodi na minimum.

Frekvencijski pretvarači konstruirani su kako bi omogućili promjenu brzine i smjer vrtnje propulzijskih motora. Izvedeni su kao izravni kako bi ukapčanjem ili iskapčanjem poluvodičkih ventila pretvorili frekvenciju i ulazni napon u traženi izlazni napon i frekvenciju, dok neizravni ispravljaju ulazni izmjenični napon u istosmjerni te ga ponovno pretvaraju u izmjenični napon na izlazu.

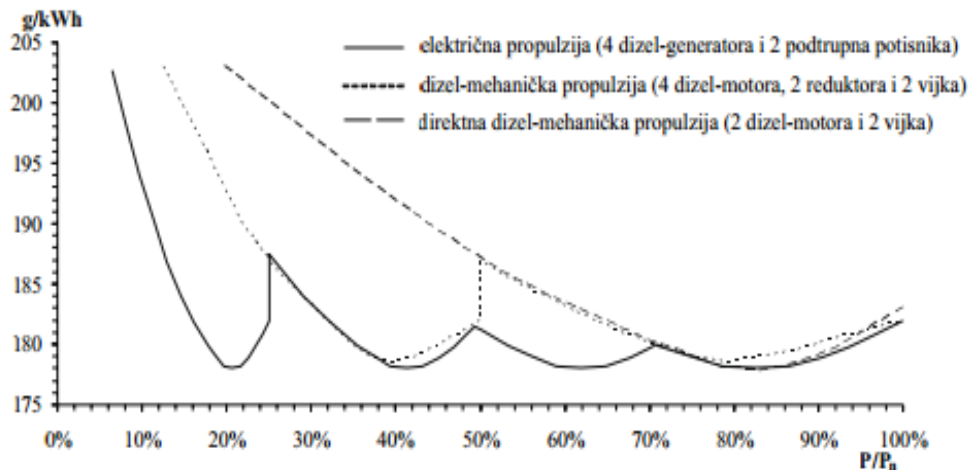
## **2.1. PREDNOSTI DIZEL ELEKTRIČNE - PROPULZIJE**

U prijašnjim vremenima pogonima bili su potrebni specifični generatori kako bi se izvršilo napajanje brodskih servisa, koj su bili izuzetno velikih dimenzija te tako zauzimali veli prostor u strojarnici. Pogoni u kojima je isti generator koristio za napajanje brodskih sustava i davanje propulzije ima izrazite prednosti, ali je problem predstavljalo napajanje propulzijskih motora jake snage sa stabilnim naponom i frekvencijom. Kako se je razvijala visokonaponska električna oprema tako su se zadovoljili uvjeti napajanja i regulacije brzine vrtnje kod istosmjernih elektromotora velikih snaga te se počela ugrađivati električna propulzija na komercijalne brodove. Razlozi odabira električne propulzije su različiti što ovisi o kojoj vrsti broda je riječ ali uglavnom se sve svodi na: ekonomičnost, raznovrsnost opterećenja, prilagodljivost prostora brodom pogonu, olakšano manevriranje i tihi rad.

Prednosti dizel-električne propulzije su:

- Dizel pogonima je tijekom rada omogućen rad pod velikim opterećenjem sa vrlo visokom učinkovitošću. Posebno se ističe kod plovila sa velikim varijacijama u količini tereta, primjerice off-shore plovila, kod kojih se radno vrijeme dijeli na vrijeme i tranziciju tereta.
- Manja potrošnja goriva te emisije štetnih plinova zbog mogućnosti optimizacije opterećenja dizel pogona.
- Višestruka redundancija motora što uzrokuje visoku pouzdanost. Čak i u slučaju kvara dizel pogona, na raspolaganju će biti dovoljno snage kako bi bilo omogućeno sigurno upravljanje plovilom.

- Smanjena cijena životnog ciklusa, što smanjuje troškove upravljanja i održavanja.
- Povećava se zapremnina tereta jer postrojenje dizel-električne propulzije zauzima izuzetno manju količinu prostora.
- Povećava se fleksibilnost u prostorima za dizel motore i propulzore. Propulzori se opskrbljuju električnom energijom preko kablova tako da ne trebaju biti u neposrednoj blizini sa dizel motorima.
- Manja količina buke propulzije i reducirane vibracije.
- Sustav je u mogućnosti generirati maksimalan moment i pri niskim brzinama, što daje prednost u primjerice zaleđenim morima.



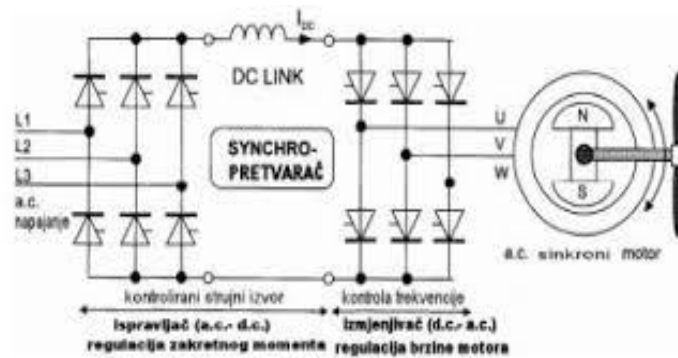
**Slika 2: Usporedba specifične potrošnje goriva u zavisnosti od ukupne razvijene snage na osovina dizelskih motora [2]**

## 2.2. OSNOVNI ELEMENTI DIZEL ELEKTRIČNOG POSTROJENJA

### Princip rada sinkrokonvertera:

Pretvarač je izveden tako da se izmjenični ulazni napon stabilne frekvencije pretvara u istosmjerni, zatim ponovno u izmjenični napon željene frekvencije. Značajka spomenutog pretvarača je korištenje sinkro-propulzijskog motora za otvaranje tiristora. Sinkromotor generira napon na spojnim terminalima pa se taj napon koristi za otvaranje tiristora.

Na ulaznu stranu pretvarača dovodi izmjenična struja čija se sinusoidalna karakteristika koristi i za otvaranje tiristora. Klasični most prenosi ispravljenu istosmjernu struju prije nego se na motornoj strani preko tiristora istosmjerni napon pretvori u izmjenični. Istosmjerni most svojim induktivitetom ispravlja smetnje u naponu i omogućava nezavisni rad dviju strana pretvarača.



**Slika 3. Sinkrokonverter [1]**

*DC link* – Istosmjerni most; *a.c. supply* – napajanje izmjeničnom strujom; *a.c. synchronous motor* – sinkroni motor

Smanjenjem ili povećanjem struje uzbude motornog dijela mijenja se i brzina vrtnje elektromotora. Ovako je pretvarač čitavo vrijeme sinkroniziran s motorom zbog čega se i naziva sinkrokonverter. Budući da su ulazna i motorna strana simetrične,

struja će kod naglih zaustavljanja broda proteći natrag prema mreži, a utjecaj magnetskog polja stvoriti moment koji pokušava zaustaviti osovinu.

Tiristori služe za propuštanje struje u određeni namot čime se inducira magnetsko polje koje vrti motor u jednom smjeru i generira moment na osovini vijka. S obzirom na to da se kod 6-impulsnog pretvarača otvaranje tiristora i propuštanje događa samo 6 puta u jednom okretaju, ovakav je način propulzije pomalo grub s povećanim vibracijama. Za smanjenje vibracija koristi se rješenje namotaja pomaknutih za  $30^\circ$  i uvođenje 12 i 24-impulsnih pretvarača. Ovaj se način rada sinkrokonvertera može primijeniti dok se elektromotor vrti brzinom dovoljnom za induciranje struje na polovima dok je pri malim brzinama vrtnje ovaj napon prenizak da bi se osiguralo otvaranje tiristora pa je potrebno koristiti alternativne metode. Najčešće se koristi karakteristika ulaznog dijela pretvarača kada se otvaranjem tiristora prebacuju faze napajanja. Struja se propušta od jednog do drugog tiristora tako što se tiristor ulaznog dijela pretvarača zatvara, zatim se otvara tiristor na motornom dijelu pretvarača nakon čega se po njegovom otvaranju tiristor opskrbnog dijela pretvarača ponovno otvara.

### **Tiristori:**

Tiristori su jedna od najkorisnijih metoda kontrole propulzijskih motora. To su elektronički elementi energetske elektronike koji poput sklopki po zadanom algoritmu električki povezuju i odvajaju ulazne i izlazne stezaljke pretvarača s ciljem postizanja željenog oblika frekvencije i napona na izlazu. Jednostavne su konstrukcije i lako izmjenjivi.



**Slika 4. Tiristor [2]**

A (anoda), K (katoda) i G (upravljačka elektroda)

Da bi se tiristor otvorio, struja mora biti pozitivno usmjerena na način da je pozitivni pol doveden na (A) anodu, negativni na (K) katodu uz niski napon doveden na upravljačku elektrodu G (*gate*). Napon doveden na *gate* mora biti pozitivan u odnosu na katodu da bi otvorio tiristor koji će tada provesti struju uz neznatne padove napona (1-2 V) tako da ne utječe na maksimalno moguće opterećenje mreže.

Isključenje tiristora nije moguće dok napon na anodi ne padne ispod minimalne granice koja drži tiristor otvorenim. Ovaj napon ovisi o samoj izvedbi i nije definiran standardom. Ako se na *gate* dovodi izmjenična struja, tada će se tiristor otvarati i zatvarati automatski promjenom polova. Gate će se otvarati dovođenjem pozitivnog pola.

### **2.3. UPRAVLJANJE POGONOM**

Sustav za upravljanje pogonom je računalom upravljani sustav za frekventne pretvarače/pogone, koji osigurava stabilnost mreže u slučaju iznenadne/dinamičke promjene opterećenja. On osigurava sigurno upravljanje frekventnim pretvaračima sa konstantnom i stabilnom snagom napajanja elektro-propulzijskih motora, te sprečava gubitak snage u svim pogonskim uvjetima. Uobičajeno se propulzija kontrolira pomoću promjene broja okretaja, na način da se sustav održava na određenom broju okretaja što je duže moguće, unutar granica potrebnog okretnog momenta i dinamičkih zahtjeva.

Sustav za upravljanje pogonom obično je povezan sa sustavom za kontrolu propulzije, sustavom za upravljanje energijom, sustavom za dinamičko pozicioniranje i nekoličinom drugih sustava za upravljanje brodom i automatizacijskim sustavima. Funkcionalnost upravljanja pogonom ovisi o konfiguraciji postrojenja i pogonskim zahtjevima.

Primarne zadaće sustava za upravljanje mogu se sumirati na sljedeće:

- Upravljanje frekventnim pretvaračima/pogonima, uključujući proračun za referentni broj okretaja
- Upravljanje brojem okretaja propelera sukladno kapacitetu alternatora, uključujući sustav za sprečavanje preopterećenja
- Upravljanje snagom i okretnim momentom (osiguranje da se nalaze unutar dopuštenih granica)
- Upravljanje hlađenjem frekventnih pretvarača

Za određene aplikacije (ledolomce, teški vremenski uvjeti, itd.), gdje se okretni moment brzo i značajno mijenja, upotrebljava se modul za kontrolu snage, koji reducira fluktuacije mreže i stabilizira opterećenje dizel motora.

## 2.4. ODABIR MOTORA

Motori za postrojenje dizel-električne propulzije moraju se izabrati prema maksimalno potrebnoj snazi za radnu točku. U nastavku se nalazi primjer proračuna za određivanje kapaciteta i opterećenja motora:

Primjer: Odobalno (Offshore) plovilo (za radnu točku)

- Potrebna snaga propulzije (na vratilu elektromotora): 7200 kW
- Maksimalno opterećenje električnih potrošača: 1800 kW

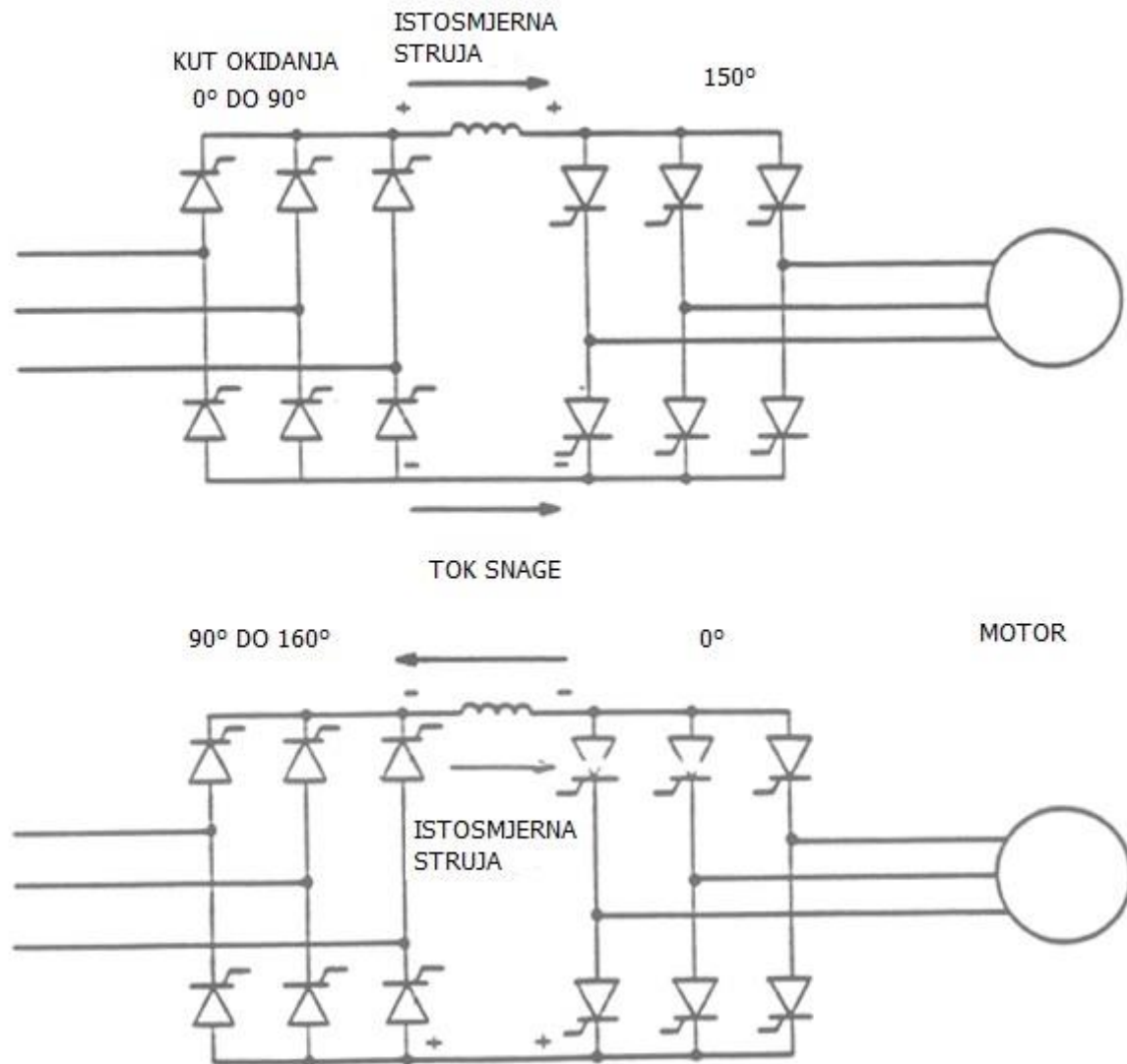
**Tablica 1: Proračun za određivanje kapaciteta i opterećenja motora [3]**

Redni broj	Subjekt	Mj. jedinica	Iznos
1	Snaga na vratilu propulzijskih motora	$P_S$ [kW]	7200
2	Koeficijent električne transmisije		0.91
3	Snaga motora za propulziju	$P_{B1}$ [kW]	7912
4	Električna snaga za brodske potrošače	[kW]	1800
5	Učinkovitost generatora		0.96
6	Snaga motora za potrošače električne energije	$P_{B2}$ [kW]	
7	Sveukupna potrebna snaga motora ( $P_{B1} + P_{B2}$ )	[kW]	9787
8	Odabir dizel motora	model	9L27/38
9	Nazivna snaga (MCR)	[kW]	2970
10	Broj motora		4
11	Ukupna instalirana snaga motora	$P_B$ [kW]	11880
12	Opterećenje motora $= (P_{B1} + P_{B2}) / P_B$	%	82.4
13	Provjera: Maksimalno dopušteno opterećenje motora	%MCR	90

Kao dodatan kriterij za odabir vrste i broja motora uzimaju se i operacijski profil plovila, strategije održavanja motora i potencijalni posebni uvjeti u kojima plovilo obavlja svoj zadatak. Prilikom odabira optimalnog broja cilindara motora često bitan utjecaj ima snaga potrebna u luci.

## 2.5. PREKRET MOTORA I REGENERACIJA

Smjer okretanja elektromotora ovisi o redoslijedu otvaranja tiristora pa nije potrebno mijenjati faze napajanja da bi se promijenio smjer vrtnje, a tok električne struje usmjeriti u željenom smjeru zahvaljujući identičnosti motorne i ulazne strane pretvarača.



**Slika 5: Tok električne struje kod propulzije i regeneracije[1]**

Kada se promotre obje strane pretvarača, jasno je vidljivo da ne postoji razlog zbog kojeg se struja generirana u motoru ne bi mogla vratiti u brodsku mrežu i koristiti



motornu stranu kao ispravljač, a ulaznu stranu kao inverter. Ovakav je način rada moguć bez ikakve dodatne opreme već samo promjenom redoslijeda otvaranja tiristora.



**Slika 6: Izmjenični propulzijski motor [8]**

### 3. MOTORI NA DVOJNO GORIVO

Dual fuel motori rade na tzv. Leanburn (izgaranje s povećanim pretičkom zraka) principu, koji omogućava da omjer zraka i goriva pogonske mješavine bude relativno visok (oko 2,1:1). Prednost ovoga koncepta je u tome što motor proizvodi znatno niže emisije dušikovog oksida  $\text{NO}_x$  ( $<1 \text{ g/kWh}$ ) zato što se oslobođena toplinska energija koja nastaje uslijed izgaranja goriva koristi za dodatno grijanje zraka, ograničavajući time temperaturu izgaranja. Važno je za naglasiti da se omjer zraka i goriva održava u uskom području vrijednosti: niti previsok (ispod 1,9:1) – detonacija će se pojaviti; niti prenizak (iznad 2,1:1) – postoji opasnost od izostanka zapaljenja (misfiring).

Motor se upućuje na dizelsko gorivo koristeći uštrcavanje dizela koji služi kao pilot gorivo. Kada se postigne stabilno izgaranje, motor se prebacuje za rad na plin. To traje oko jednu minutu, za vrijeme čega postupno u sustav goriva dolazi plin. Motor je moguće u radu prebaciti s plina na dizelsko gorivo pri bilo kojem opterećenju. U slučaju prekida rada motora uslijed nedovoljne dobave plina ili nekog drugog razloga, motor se automatski prebacuje na dizelsko gorivo. Kada se spomenuti nedostaci otklone, operator može ponovno prebaciti motor na plin. To je moguće učiniti pri opterećenjima čak i do 80%.

#### **Usis zraka i ubrizgavanje plina**

U usisnom taktu plin se dobavlja preko dobavnog ventila plina i miješa se sa zrakom koji se usisava kroz otvoreni usisni ventil pod djelovanjem podtlaka u cilindru motora kada se klip kreće prema dolje, kao i kod standardnih dizelskih motora.

#### **Kompresija mješavine plina i zraka**

Mješavina se neće upaliti samozapaljenjem pod utjecajem kompresije zato što plin ima visoku temperaturu samozapaljenja.

#### **Uštrcavanje pilot goriva i zapaljenje**

Kada klip dođe u gornju mrtvu točku mala količina dizelskog goriva (oko 1%) se uštrcava kroz sapnicu na rasprskачu. Pilot dizelsko gorivo se zapali samozapaljenjem pod utjecajem kompresije, i tada upali mješavinu plina i zraka. Održavanje ispravne vrijednosti omjera goriva i zraka u svim režimima rada motora je

od iznimnog značaja kako bi se spriječila pojava detonacije i zakašnjelo paljenje smjese.

Osnovna ideja ove tehnologije je u tome da se koristi elektroničko upravljanje uštrcavanjem dizelskog goriva koje služi kao pilot gorivo, kako bi se omogućilo zapaljenje točno određene količine smjese prirodnog (ili nekog drugog) plina i zraka.

### 3.1. WÄRTSILÄ 50DF POGONSKI MOTORI

Wärtsilä 50DF je četverotaktni, nereverzibilni motor sa dvojnim gorivom sa turbopunjačem i unutarnjim hlađenjem, direktnim ubrizgavanjem tekućeg i indirektnim ubrizgavanjem plinskog goriva. Motor može raditi u plinskom modu ili standardnom dizel modu rada.

**Tablica 2: Osnovni parametri motora [7]**

<b>Promjer cilindra</b>	500 mm
<b>Radni hod</b>	580 mm
<b>Radni volumen</b>	113.9 l/ciklusu
<b>Broj ventila</b>	2 usisna i 2 ispušna ventila
<b>Konfiguracija cilindara</b>	6, 8 i 9 linijski, 12, 16 i 18 u V-formaciji
<b>V-kut</b>	45°
<b>Smjer rotacije</b>	u smjeru kazaljke
<b>Broj okretaja</b>	500, 514 rpm
<b>Srednja brzina klipa</b>	9.7, 9.9 m/s

### 3.1.1. SUSTAV GORIVA

Wärtsilä 50DF motor dizajniran je za neprestan rad pogonjen prirodni ukapljenim plinom ili dizelom (eng. Marine Diesel Fuel – MDF). Također je moguće pogoniti motor na teška goriva.

#### Sustav pogonjen plinom

Sustav motora pogonjenog plinom zahtijeva iduću ugradnju opreme:

- Niskotlačnu common rail cijev za plin;
- Ventile za prihvata plina za svaki cilindar;
- Sigurnosne filtere za svaki ventil za plin;
- Ventil za ventilaciju common rail cijevi;
- Plinske cijevi sa dvostrukom stijenkom.

Common rail cijev za plin dostavlja plin svakom ventilu za prihvata plina. Potpuno je zavarene izvedbe sa jednostrukom stijenkom, velikog promjera, što rezultira akumulacijskim djelovanjem. Dobavne cijevi distribuiraju plin iz common rail (zajedničke sabirnice) cijevi u ventile za prihvata plina na svakome cilindru.

Ventili za prihvata plina (jedan za svaki cilindar) su elektronički upravljani, pri čemu se aktiviraju u svrhu dobave točno određene količine plina u svaki cilindar. Reguliraju se sustavom za regulaciju motora, pomoću njih se regulira broj okretaja i snaga motora. Ventili su locirani na glavi cilindra (V-izvedba motora) ili na usisnom dijelu cilindarske glave (linijska izvedba motora). Ventil za prihvata plina je izravno upravljani solenoidni ventil. Ventil se zatvara pomoću opruge (pozitivno brtvljenje) kada nema električnog signala. Pomoću sustava za regulaciju motora moguće je regulirati količinu plina koji će se dobavljati svakog cilindru za balansiranje opterećenja motora, dok je motor u pogonu. Ventili za prihvata plina također u sebi sadrže sigurnosne filtere propusnosti 90 µm.

Ventil za ventilaciju common rail cijevi koristi se u svrhu ispuštanja plina iz common rail cijevi kada se motor prebacuje iz plinskog u pogon na dizel gorivo. Ventil je pneumatski aktiviran i upravljani regulacijskim sustavom strojnice.

Plinski fini filter je jedinica koja pokriva čitavo polje strujanja u cijevi, time sprečavajući ulaz nečistoća u sustav za sustav za plin. Finoća filtera je 5  $\mu\text{m}$  apsolutne veličine mreže (0.5  $\mu\text{m}$  pri 98.5%-tnoj separaciji). Filter je lociran u vanjskom sustav ukoliko se koriste cijevi za plin sa dvostrukim stijenkama.

### Glavno ubrizgavanje tekućeg goriva

Glavni sustav za ubrizgavanje tekućeg goriva koristi se kada motor radi pogonjen dizel gorivom. Kada je motor pogonjen plinom, gorivo struji kroz glavni sustav za ubrizgavanje tekućeg goriva čitavo vrijeme, omogućavajući pritom trenutačan prelazak na pogon isključivo na dizel gorivo.

Unutarnji sustav ubrizgavanja tekućeg goriva motora sastoji se od sljedeće neophodne opreme za svaki cilindar:

- Pumpe za ubrizgavanje goriva
- Visokotlačne cijevi
- Dvostrukog ventila za ubrizgavanje (za glavno i pilot gorivo)

Dizajn pumpe za ubrizgavanje goriva je jednoelementnog tipa dizajnirana za tlakove ubrizgavanja do 150 MPa. Pumpe za ubrizgavanje imaju ugrađene kotrljajuće podizače, koji su također opremljeni sa pneumatskim zaustavnim cilindrima, koji su povezani sa sustavom za sprečavanje prevelikog broja okretaja.

Visokotlačna cijev za ubrizgavanje je spojena na pumpu za ubrizgavanje sa ventilom za ubrizgavanje. Cijev ima dvostruku stijenku i dobro je zaštićena unutar hotboxa motora.

Dvostruki ventil za ubrizgavanje kombinacija je glavnog ventila za ubrizgavanje goriva te ventila za ubrizgavanje pilot goriva, smještenog u središtu glave cilindra. Za glavni dio dizel injekcijske opreme ventila koristi se tradicionalno rješenje sa igličastim ventilom koji je prednapregnut oprugom.

Hotbox sadrži sve glavne dijelove za ubrizgavanje goriva i sustav cijevi, ostvarujući maksimalnu pouzdanost i sigurnost. Visokotlačna strana glavnog sustava ubrizgavanja je potpuno odvojena od ispušne plinske strane te prostora za podmazivanje motora. Pri dolasku bilo kakvog curenja u hotbox, odvodi se u svrhu sprečavanja miješanja goriva sa uljem za podmazivanje. Iz tog istog razloga se pumpe za ubrizgavanje potpuno odvajaju od odjeljka za bregastu osovinu.

### **Ubrizgavanje pilot goriva**

Pilot gorivo se ubrizgava u svrhu zapaljenja smjese zraka i plina u cilindru kada je motor pogonjen plinom. Za ubrizgavanje pilot goriva koristi se identičan sustav dobave tekućeg goriva kao i za glavni sustav ubrizgavanja.

Sustav za ubrizgavanje pilot goriva sastoji se od sljedeće opreme:

- Filter za pilot gorivo;
- Common rail visoko-tlačnu pumpu;
- Common rail cjevovod;
- Dvostruki ventil za ubrizgavanje za svaki cilindar.

Filter za pilot gorivo pokriva čitav presjek strujanja i sprečava ulazak nečistoće u sustav za pilot gorivo. Finoća filtera je 10  $\mu\text{m}$ .

Visokotlačna pumpa za gorivo je pokretana motorom u slučaju dizel-električnih motora koji pokreću generatore, u slučaju motora sa promjenjivom brzinom pogona propelera – električno. Na slobodni kraj motora se montira pumpa za pilot gorivo. Regulacija tlaka dostavljenog goriva vrši se sustavom za regulaciju motora te iznosi oko 100 MPa.

Pilot gorivo dostavlja se iz pumpne stanice u common rail sustav manjeg promjera te mora biti pod visokim tlakom. Common rail cijev dostavlja pilot gorivo svakom ventilu djelujući kao akumulator koji suzbija tlačne impulse.

Pilot dizel injekcijski dio ventila za dvostruku injekciju goriva sastoji se od igle aktivirane solenoidom, kontroliranog od strane sustava za regulaciju motora. Pilot dizel

gorivo dostavlja se kroz visokotlačnu vezu u držaču sapnice. Kod motora pogonjenih dizel gorivom, pilot ubrizgavanje goriva služi i za čišćenje igle.

### **3.1.2. SUSTAVI ZA PODMAZIVANJE I HLAĐENJE MOTORA**

Glavni djelovi unutarnjeg sustava za podmazivanje motora su: motorom pogonjena pumpa sa ventilom za regulaciju tlaka, glavna distribucijska cijeva, izravno prostrujavani filteri, i bypass centrifugalni filter.

Sustav za hlađenje vode dijeli se na niskotemperaturni i visokotemperaturni krug. Unutarnji sustav za hlađenje motora sastoji se od motorom pogonjenih niskotemperaturnih i visokotemperaturnih pumpi, glave cilindra i linijskih rashladnih krugova, te nisko-temperaturnih i visokotemperaturnih hladnjaka zraka.

### **3.1.3. SUSTAV TURBOPUHALA**

SPEX (eng. Single Pipe EXhaust system) sustav turbopunjenja kombinira prednosti pulsni i sustava sa konstantnim tlakom. Ispuh je zatvoren unutar toplinski izolirane kutije koja osigurava niske površinske temperature.

Motori sa linijskom izvedbom imaju jedan turbopunjač, a V-izvedbe motora imaju po jedan turbopunjač za svaki red cilindara. Turbopunjači su montirani poprijeko, smješteni se na slobodan kraj motora. Također je moguća izvedba vertikalnog, uzdužno nagnutog i horizontalno ispušnog sustava.

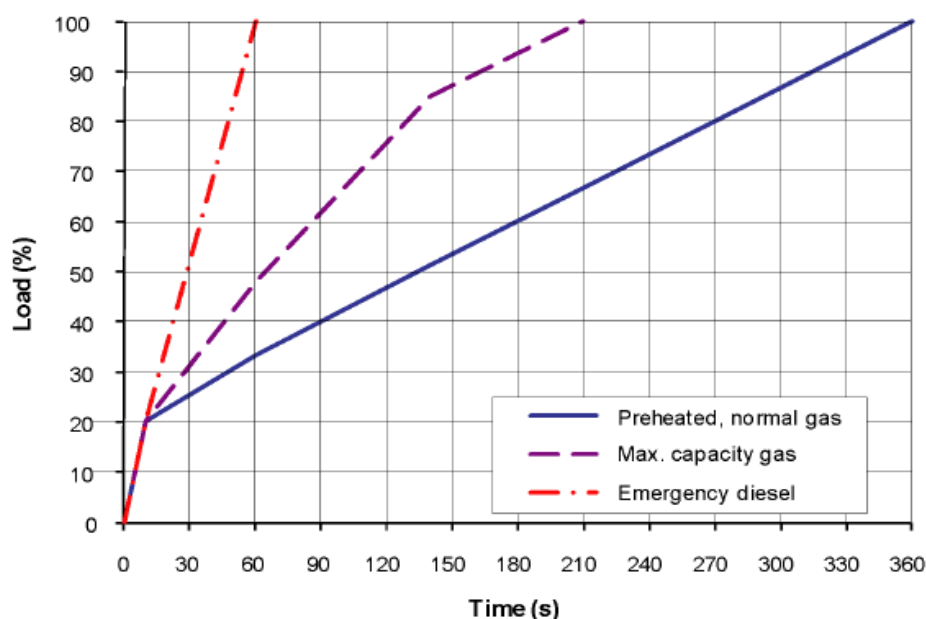
U svrhu optimizacije sustava turbopunjenja za rad pod niskim i visokim opterećenjem, kao i za pogon na dizel, odnosno plin, instaliran je sustav otpuštanja „waste gate“ na strani ispuha plina. Sustav otpuštanja (Waste gate) se aktivira pri visokim opterećenjima.

Hladnjak zraka je standardni sa dvije razine, sastoji se od visokotemperaturne i niskotemperaturnog vodene razine. Za hlađenje oba koristi se obična voda. Za čišćenje turbopunjača tijekom rada koriste se standardni uređaji sa pranje vodom, za ispušnu, kao i stranu za punjenje zraka.

Konstrukcija turbopunjača je izvedena sa unutrašnjim ležajima, što omogućava jednostavno održavanje kasetnog dijela sa strane kompresora. Turbopunjač se podmaziva uljem za podmazivanje motora sa integriranim spojnicama.

### 3.1.4. OPTEREĆENJE I MAKSIMALNA IZLAZNA SNAGA MOTORA

Reguliracija povećanja opterećenja je esencijalna za motore sa turbopunjačima, iz razloga što je turbopunjaču potrebno određeno vrijeme za ubrzanje prije nego što može isporučiti potrebnu količinu zraka. Potrebno je osigurati da prođe dovoljno vremena da se osigura ravnomjerna raspodjela temperature u komponentama motora. Motori sa dvojnim gorivom pogonjeni u plinskom modu zahtijevaju preciznu kontrolu omjera zrak/gorivo, što čini regulaciju stupnja porasta opterećenja presudnom za rad na plinski pogon.



**Slika 7: Maksimalno povećanje stupnja opterećenja za različite brzine vrtnje [7]**

Kategorija opterećenja „predgrijan, normalan plin“ koristi se kao početno stanje opterećenja za dizelski te plinski pogon. Ako regulacijski sustav posjeduje samo jednu kategoriju za povećanje opterećenja, mora se koristiti kategorija za predgrijani motor. HT (high temperature-visoka temperatura) vode u pregrijanom motoru mora iznositi



najmanje 60°C, najčešće iznosi 70°C, temperatura ulja za podmazivanje mora iznositi barem 40°C.

Kategorija „maksimalni plinski kapacitet“ indicira maksimalnu snagu opterećenja motora tijekom pogona na plin. Veća opterećenja se rezultiraju alarmima, prekidima i nepoželjnom prebacivanju na dizel pogon. Ova kategorija se također može koristiti za uobičajeno opterećenje i pri dizel modu rada čim motor dosegne potrebnu radnu temperaturu.

Maksimalna se kategorija opterećenja „dizel za hitne slučajeve“ nalazi blizu granice maksimalnog kapaciteta motora koji za pogon koristi dizel gorivom. Ova kategorija se rijetko koristi kao uobičajeno stanje opterećenja. Opterećenje za hitne slučajeve aktivira se samo aktivacijom funkcija za hitne slučajeve, koja pokreće glasanje alarma u kontrolnoj sobi i na mostu.

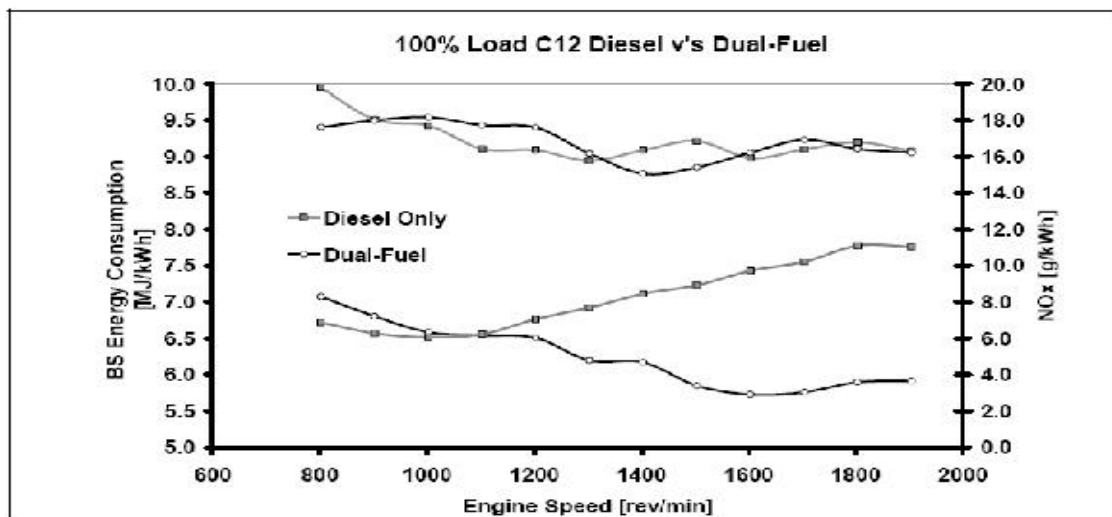
Povećavanje opterećenja se uvijek mora izvoditi postupno tijekom uobičajenih radnih uvjeta. Pri modu rada na plin prihvatljiva opterećenja su izuzetno manja nego u modu rada na dizel, također su manja pri većem opterećenju, uzimajući u obzir aplikacije sa iznenadnim promjenama opterećenja. Maksimalno opterećenje se ne smije prekoračiti između povećanja opterećenja. U slučaju električne generacije snage, klasifikacijska društva biti će kontaktirana u ranim fazama projekta ovisno o specifikacijama sustava i mogućnosti opteretivosti motora.

Električni generatori moraju biti u mogućnosti prihvatiti 10%-tnog preopterećenja. Maksimalna izlazna snaga motora je 110% kod dizel pogona, a 100% kod plinskog pogona. Prijelaz na dizel pogon se obavlja automatski u slučaju preopterećenja. Spuštanje metanskog broja ispod specificiranog može također rezultirati u automatskom prebacivanju na dizel pogon kada je opterećenje u blizini 100% izlazne radne snage. Očekivane varijacije u kvaliteti plinskog goriva i trenutačno

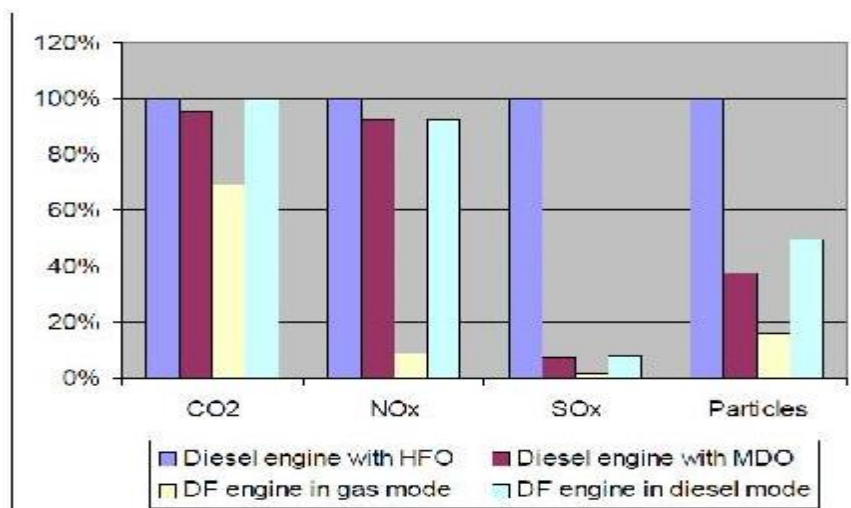
opterećenje moraju se uzeti u obzir u svrhu osiguravanja rada motora pogonjenog plinskim gorivom.

### 3.2. USPOREDBA EMISIJA ISPUŠNIH PLINOVA KOD MOTORA NA DVOJNO GORIVO I DIZELSKIH MOTORA

Na slikama 8 i 9 prikazano je kako se postižu niže emisije NO<sub>x</sub> pri približno istoj učinkovitosti rada motora ispitivanjem rada dual fuel motora s tzv. back-to back engine testom pri zajedničkim uvjetima, kao i usporedba emisija ispušnih plinova kod klasičnog dizel- skog motora kada radi na dizelsko i na teško gorivo i dual fuel motora kada radi na dizelsko gorivo i na plin.



Slika 8: Učinkovitost dizelskog i dual fuel motora i emisija NO<sub>x</sub>-a pri punom opterećenju [9]



**Slika 9: Usporedba emisija ispušnih plinova između dizelskog i dual fuel motora [9]**

### 3.3. Wärtsilä RT- FLEX 50DF 2 – TAKTNI MOTOR S NISKOTLAČNIM SUSTAVOM DOBAVE

Wartsila RT-flex dual fuel je 7- cilindričan, dvotaktan motor na dvojno gorivo s niskotlačnim sustavom (< 16bar) dobave plina koji radi po Otto ciklusu. Princip rada motora je sličan kao kod auta, međutim nikad prije nije bio primjenjen na dvotaktnim motorima. Na ovaj način se količina pilot goriva značajno smanjuje, te se zbog niskotlačnog sustava dobave u potpunosti otvara mogućnost korištenja LNG-a (liquid natural gas) kao pogonskog goriva.

S obzirom da je motor na dvojno gorivo s niskotlačnim sustavom dobave potpuno optimiziran za rad na ukapljeni prirodni plin, njegova maksimalna izlazna snaga je niža za oko 15-20% nego kod dizel motora jednake snage. U današnje vrijeme to ne predstavlja veliki problem, budući da gotovo nitko ne koristi pogonski motor na maksimalnoj nazivnoj snazi, zbog utroška goriva odnosno njegove velike cijene po barelu.

Smanjenje maksimalne snage motora od 15-20 % kod ove vrste motora riješio se problem “knocking” (kucanja u cilindru) koji se ranije pojavljivao kod 4-taktnih motora. Najveća prednost korištenja prirodnog ukapljenog plina kao pogonskog goriva je što nema sumpora u njemu, a koristeći niskotlačni motor na principu Otta također zadovoljava Tier III NOx limite – 80% manje nego Tier II granice bez ikakvih dodatnih tretmana pogonskog plina.

### **3.3.1. SPECIFIČNA POTROŠNJA GORIVA**

Specifična potrošnja goriva mjeri se prema snazi motora za goriva slabije kalorijske vrijednosti 42,7 MJ/kg, za tekuća goriva i 50,0 MJ/kg za plinska goriva, prema ISO standardnim referentnim uvjetima (ISO 15550 i 3046).

Za Wartsila 2-taktne motore na dvojno gorivo, tolerancije za specifičnu potrošnju goriva su:

- + 5% za 100% do 85% opterećenje motora
- +6% za 84% do 65% opterećenje motora
- +7% za 64% do 50% opterećenje motora

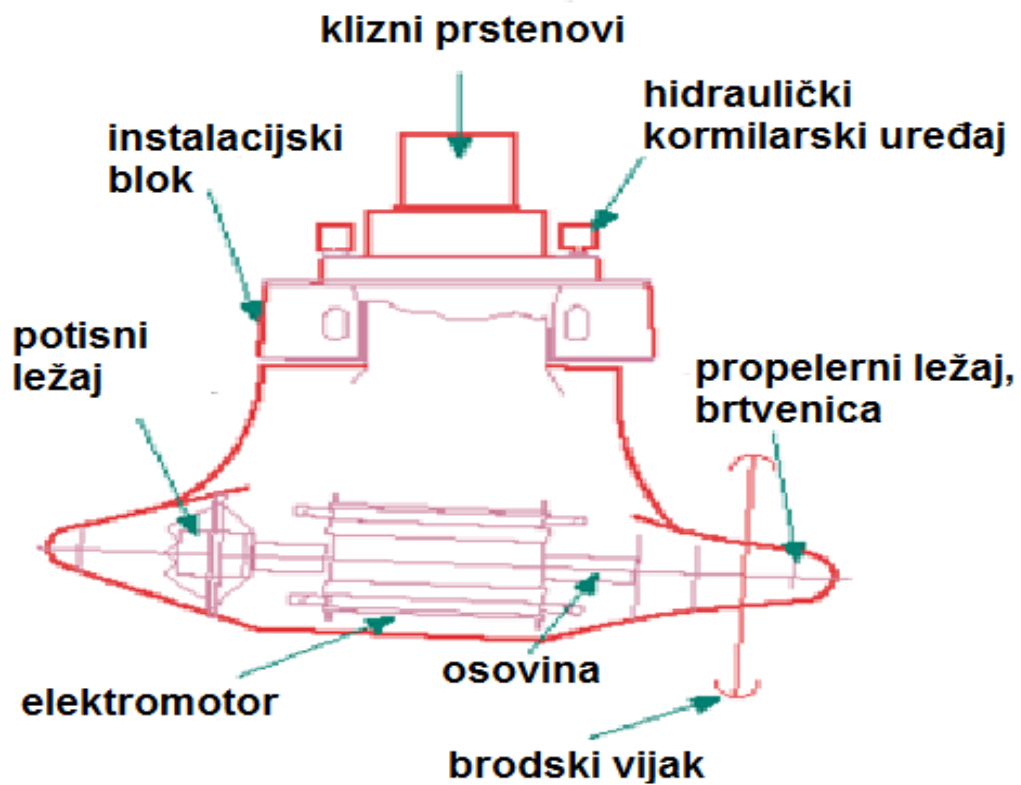
### **3.3.2. PODMAZIVANJE CILINDRA**

Još uvijek je u razvoju pulsirajući (Pulse Jet) sustav podmazivanja s elektronički kontroliranim vremenom ubrizgavanja, pridavajući značajne uštede ukupnim troškovima broda. Omjer utroška ulja za podmazivanje s ovim načinom podmazivanja iznosi 0,6 g/kWh.

## **4. AZIPOD SUSUTAV PROPULZIJE**

Sustav propulzije Azipod (Azimuthing Podded Drive) koji je nastao u maloj finskoj tvrtki prvobitno je bio zamišljen kao uređaj koji je trebao, poboljšanjem

upravljivosti, unaprijediti svojstva ledolomaca. Prvi Azipod je 1990. godine ugrađen na pomoćni brod Seiti. Sada se Azipod može nabaviti za snage od 5MW do 35MW.



Slika 10 Azipod sustav, glavni dijelovi [10].

Pri manjim snagama, od 0,4 MW do 5 MW, razvijen je posebni model nazvan Compact Azipod. Ovaj uređaj može biti izveden ili s porivnim vijkom ili s vučnim

slobodnim vijkom. Tako se danas POD propulzori tvrtke ABB, zahvaljujući širokom rasponu snage od 400 kW do 35 MW, mogu ugrađivati na brodove različitih veličina.



**Slika11 Azipod [10]**

#### 4.1. OSNOVE AZIPOD TEHNOLOGIJE

Azipod je koncept električne propulzije kojemu je propulzivni motor postavljen unutar elipsoidnog aerodinamičkog oblika potopljenog u vodu, sa mogućnošću neograničenog okretanja unutar kruga od 360 stupnjeva.

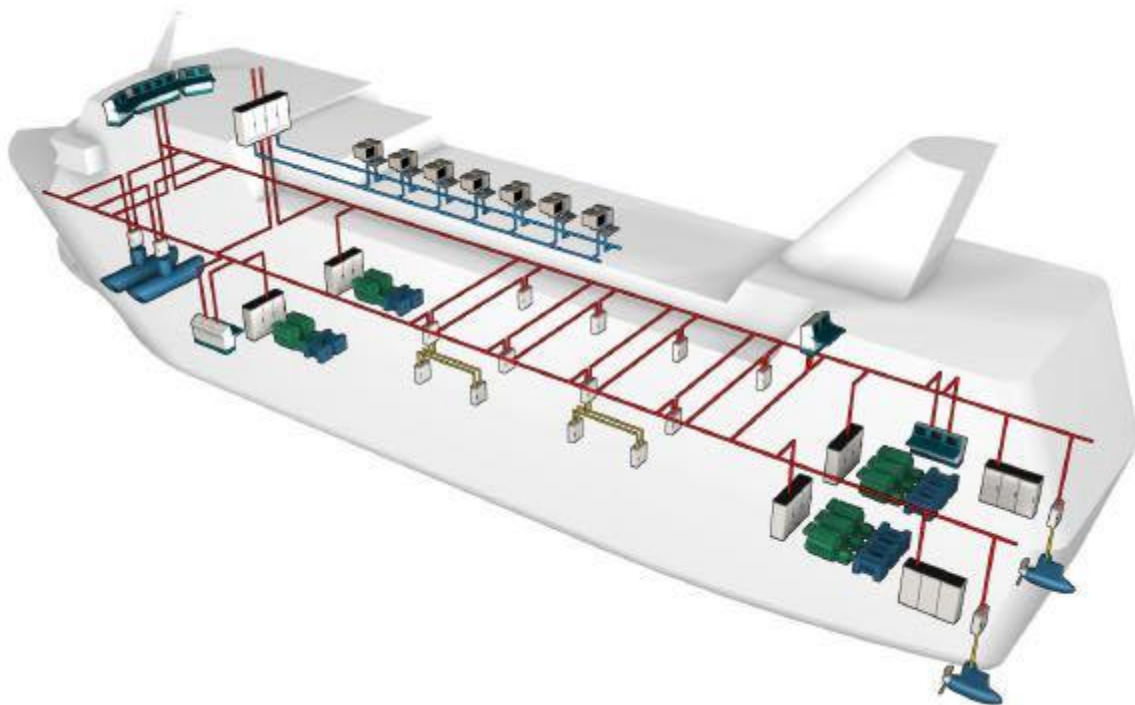
Izraz Azipod je nastao od skraćenog engleskog izraza: „Azimuthing Electric Pod Propulsion Drive“. Električni motor je spojen na izrazito kratku propelersku osovinu. Uobičajeno je električni motor beskontaktni sinhroni motor s permanentnim magnetima koji je upravljani s frekvencijskim upravljačima, da bi se postiglo kontinuirano upravljanje brzinom okretaja električnog motora u cjelokupnom opsegu mogućih brzina, također uključujući i lagani start izbjegavajući velike trzaje u stadiju početne brzine. Kod manjih snaga se upotrebljavaju asinhroni kavezni motori.

Jedinice Azipod propulzije su u današnje vrijeme dostupne i do 30 MW a sa upotrebom turbinsko-električne kombinacije i do 35 MW snage. Od 1990. kada je prvi put na nekom brodu ugrađena. Danas postoje četiri različita sustava azimutalnog električnog poriva s ugrađenim podtrupnim potisnicima od kojih je ABB-ov AZIPOD najpoznatiji.

Za razliku od klasičnih propulzijskih sustava gdje se električni propulzijski motor nalazi unutar broskog trupa, ovdje je električni motor smješten u posebnoj konstruiranoj gondoli pod trupom. Čitava gondola se može zakretati za puni krug tj. 360 stupnjeva čime je nestala potreba za klasičnim kormilarskim sustavom, a nije potrebno ni preokretanje propulzijskog motora kojega je moguće okretati stalno u istom smjeru. Time su znatno poboljšane manevarske sposobnosti pa kod manjih brodova više nije neophodna ni upotreba pramčanih porivnika (eng. thruster) jer je ostvareno smanjenje zakretnog radijusa za 40%. Osim navedenih propulzijskih sinhronih i asinhronih motora koriste se i u SSP pogonima permanentno uzbuđeni sinhroni motor znatno manje težine i dimenzija u odnosu na klasični sinhroni motor kako bi se dodatno poboljšala hidrodinamička svojstva broda.

Električni motor je preko vrlo kratke osovine povezan s vijkom s fiksnim krilima kako bi se znatno smanjile vibracije broskog trupa, budući da je motor u mahuni duboko uronjen u morsku vodu, tako da kao glavni rashladni medij električnom motoru služi okolna morska voda, što dodatno umanjuje cijenu sustava. Unutrašnji sustav hladi se pomoću zračnih ventilatora.

Na slici 12, shematski je prikazan sustav električne propulzije s podtrupnim potisnicima, Azipod-ima, te smještaj njegovih komponenti na brodu.



**Slika 12. Sustav električne propulzije s podtrupnim potisnicima – Azipod [10]**



## 4.2. DIJELOVI AZIPOD SUSTAVA

Osnovi dijelovi Azipod sustava su:

- Unutrašnji azipod sustav tj. sustav u unutrašnjosti broda;
- Vanjski sustav tj. podtrupni dio azipodnog sustava.

### 4.2.1. UNUTRAŠNJI AZIPOD SUSTAV

Unutrašnji sustav čine:

- Generatori s pogonskim dizel motorima;
- Transformatori i prigušnice;
- Frekvencijski pretvarači;
- Hidraulički ili električni uređaji za upravljanje zakretanja podtrupnog potisnika.

Za pogon generatora koriste se srednjohodni i brzohodni dizel motori i plinske turbine. Najčešće se koristi izmjenični sinhroni generator snage do 38 MW. U pravilu se sinhroni generatori uzbuđuju istosmjernom strujom, ali se ponekad izvode i s permanentnim magnetima, a buđeni su i sa izmjeničnom strujom. Ovi posljednji se nazivaju reakcionim generatorima. Nepokretni dio sinhronog generatora se zove stator, a rotirajući dio rotor. Istosmjerna struja, potrebna za napajanje uzbudnog namota, obično se dobiva od posebnih istosmjernih strojeva, tzv. uzбудnika.

**Transformatori** mrežni napon transformiraju i prilagođavaju uvjetima i potrebama propulzijskim frekvencijskim pretvaračima i elektromotorima, te svojim induktivitetom smanjuju komutacijske propade napona i harmoničko izobličenje struje pretvarača a time i napona mreže. Kod azipod sustava su zastupljeni uljni i suhi transformatori. Transformatori kod azipod električne propuzije najčešće rade u cik-cak i štednom spoju.

**Prigušnice** se koriste za smanjenje komutacijskih propada i harmoničkog izobličenja napona napajanja frekvencijskih pretvarača mrežnim naponom. One se također smatraju i funkcionalnim dijelovima ispravljača u sklopu širinsko-impulsno moduliranih aktivnih filtera. Prigušnice imaju samo jedan namot po fazi te su zbog toga njihova masa, cijena i gubici mnogo manji nego kod transformatora.

**Pretvarači frekvencije** imaju osnovni zadatak omogućiti promjenu smjera vrtnje i broja okretaja propelera u širokom rasponu brzina. Koriste se indirektni i direktni pretvarači frekvencije. Kod direktnih pretvarača frekvencije se iz valnog oblika ulaznog izmjeničnog napona sintetizira željeni oblik izlaznog napona i frekvencije, ukapčanjem i iskapčanjem poluvodičkih elektroničkih ventila. Kod indirektnih pretvarača frekvencije se ulazni izmjenični napon ispravlja u istosmjerni napon, sintetizira i obrađuje, te ponovno vraća u izmjenični napon na izlaz.

Azipod električna propulzija postavlja pred frekvencijske pretvarače sljedeće zahtjeve: velika snaga, rad u sva četiri kvadranta, nizak stupanj korisnosti, nizak sadržaj viših harmonika na izlazu, nisko izobličenje ulazne struje, visok faktor snage, visoku pouzdanost, jednostavnost održavanja i dijagnostike, malu masu i volumen, nisku cijenu itd. Kod azipod propulzije kao i kod obične električne propulzije, uvijek se nalaze dva frekvencijska pretvarača, kako bi u slučaju otkazivanja jednog preostala snaga bila dovoljna za daljnje funkcioniranje poriva. Danas se u sustavima električne propulzije s azipod sustavom gotovo isključivo koriste 12-pulsne konfiguracije sastavljene od dva neovisna 6-pulsna sinkrokonvertora napajana iz galvanski odvojenih fazno pomaknutih transformatora, priključena na odvojene namotaje dvonamotnog propulzijskog elektromotora.

Maksimalne snage sinkrokonvertora korištenih u azipod električnoj propulziji su do 25 MW, ali proizvođači nude i sinkrokonvertore mnogo veće snage npr. 38 MW uz napon na elektromotoru i do 20 kV. Sinkrokonvertor može raditi u sva četiri kvadranta.

Ciklokonvertor je najstariji i za sada još uvijek jedini direktni frekvencijski pretvarač u komercijalnoj upotrebi. Maksimalna snaga korištenja je do 20 MW uz napone na motoru do 2,2 kV. Zbog načina rada, ciklokonvertori ne mogu podizati nego samo snižavati frekvenciju, a kvaliteta izlaznog napona i struje pada s povećanjem frekvencije izlaznog napona, koja u pravilu ne prelazi 30%.

Prednost ciklokonvertora uz to što mogu raditi pri visokim snagama uz minimalno održavanje je i rad u sva četiri kvadranta bez dodatnih sklopnika, te odlična dinamika kod pokretanja i malih brzina, što je posebno važno za brodove koji se često podvrgavaju naglim manevrima. Većinom se ciklokonvertori u novije vrijeme koriste kod ledolomaca i putničkih brodova za kružna putovanja.

#### **4.2.2. VANJSKI AZIPOD SUSTAV**

Vanjski sustav čine:

- Nosač motora s mahunastom, čeličnom oblogom;
- Električni motor smješten u čeličnoj gondoli s pripadajućim kabelima i prstenovima za napajanje i mehanikom;
- Brodski vijak (propeler).

Nosači motora mogu biti izrađeni u nekoliko serija i njihovih varijanti i podvarijanti. Najznačajnija podjela je na:

- Azipod C (Compact) serije;
- Azipod V (Classic) serije;
- Azipod X (New Generation – Nove generacije) serije.

Azipod C (Compact) serija se dijeli na CO i CZ varijantu. CO varijanta se koristi u primjeni za jahte, putničke brodove, trajekte, tankere, opskrbne brodove na otvorenom moru, istraživačke brodove. CZ varijanta se koristi za platforme i brodove

za bušenje podmorja i za porivni pogon stupova i bitvi za vezivanje brodova na otvorenom moru.

*Azipod V (Classic)* serija se dijeli na VO i VI varijantu. VO varijanta se koristi za brodove za krstarenje i trajekte. VI varijanta se koristi za ledolomce, te brodove za generalni teret, opskrbe brodove, tankere, LNG prijevoznike uz mogućnost razbijanja leda u zaleđenim morima.

*Azipod X (New Generation)* serije se dijeli na XO i XC varijante. XO varijanta se koristi za brodove za krstarenje, trajekte, tankere, LNG brodove i ratne brodove. XC varijanta se koristi za brze trajekte, LNG brodove i kontejnerske brodove.

Varijanta CRP azipoda (CRP-contra rotating azipod propulsion) je predviđena za ugradnju na brodove s klasičnom dizel propulzijom. Kontra (suprotno) rotirajuća azipod jedinica se ugrađuje iza fiksnog vijka klasične propulzije čime se povećava stupanj efikasnosti propulzije, smanjenje potrošnje goriva te povećanje snage poriva i do 100 MW.

Elektromotori koji se najčešće upotrebljavaju za azipod propulziju su:

- Asinhroni motori;
- Sinhroni motori s uzбудnim namotima;
- Sinhroni motori s permanentnim magnetima.

Asinhroni motori su najrašireniji elektromotori u brodskim i kopnenim elektromotornim pogonima. U današnje vrijeme se propulzijski asinhroni kavezni motori koriste u više varijanta:

- Za pogon broskog vijka s prekretnim krilima konstantnom brzinom;
- Za pogon broskog vijka s fiksnim krilima promjenjivom brzinom;
- Za podtrupne potisnike.

Asinhronim motorom se naziva takav stroj izmjenične struje, kojem se brzina vrtnje rotora  $n$ , pri danoj frekvenciji struje u mreži, mijenja u ovisnosti o opterećenju. Asinhronne motore dijelimo na beskolektorske i kolektorske. Kod azipod propulzije se uglavnom koriste beskolektorski asinhroni motori i to kavezni asinhroni motori. Mogu biti konstruirani kao motori s dubokim utorima, motori s dvostrukim kavezima te polno preklopivi motori s povećanim klizanjem.

Nedostaci asinhronog motora su:

- motor treba induktivnu struju magnetiziranja, uslijed čega se pogoršava  $\cos\Phi$  mreže;
- slabo zadovoljavaju regulacijske karakteristike, naročito pri kontinuiranom reguliranju brzine vrtnje u širokim granicama imaju loše karakteristike pokretanja najekonomičnijeg kaveznog motora.

Nastojanja da se te teškoće savladaju postigla su tek djelomičan uspjeh. U pogledu  $\cos\Phi$  asinhroni motor ustupa prednost sinhronom motoru, a u pogledu regulacijskih karakteristika istosmjernim motorima.

Svestrano istraživanje te racionalizacija proizvodnje asinhronih motora u svakom njegovom dijelu omogućili su znatno sniženje njihove mase i dimenzije bez štete po radne karakteristike. Razvojem statičkih pretvarača frekvencije, asinhroni motori su dobili karakteristike upravljanja prije svojstvene samo istosmjernim motorima što je omogućilo njihovu upotrebu u reguliranju elektromotornim pogonima. Za optimalnu upotrebu se smatra da je asinhronne motore i najekonomičnije koristiti kod većih nominalnih brzina i snaga do 8 MW.

Prednosti asinhronih kaveznih motora proizlaze iz jednostavne i robusne konstrukcije rotora a to su:

- Jednostavno održavanje;
- Niska cijena;
- Dobra mogućnost preopterećenja;
- Robusnost i pouzdanost;
- Male dimenzije i težina;
- Jednostavnije upravljanje itd.

U potpunoj zatvorenoj izvedbi, unutar podtrupnih potisnika, asinhroni motori ne zahtijevaju nikakvo održavanje. Asinhroni motori su izuzetno pouzdani a najčešći kvarovi su vezani za ležajeve. U današnje vrijeme se upotrebljavaju Asinhroni motori s više faza npr. 15 koji daju snagu i do 20 MW. Kod ovih motora se uglavnom koriste frekvencijski pretvarači ciklokonvertori i širinsko-impulsno modulirani (ŠIM) pretvarači.

Sinhroni motori se kod azipod propulzije koriste u dvije varijante i to s uzbudnim namotajima i s permanentnim magnetima. Prednost se daje sinhronim motorima s permanentnim magnetima.

U današnje vrijeme se posebno u sklopu podtrupnih potisnika, polako napuštaju klasični sinhroni motori s uzbudnim namotima, a zamjenjuju ih sinhroni motori s permanentnim magnetima.

Ove dvije vrste sinhronih motora se koriste u električnoj propulziji i azipodima od njihovih početaka ali prava njihova primjena i dominacija je počela pojavom tiristorskih pretvarača frekvencije tj. upotrebom ciklokonvertora i sinkrokonvertora. Kod upotrebe s ciklokonverterom, Sinhroni motor radi s faktorom snage  $\cos\Phi = 1$ , dok

kod primjene s sinkrokonverterom radi u kapacitivnom području s faktorom snage  $\cos\Phi=0,9$ .

Najznačajnije kompanije koje su počele proizvoditi motore s permanentnim magnetima su bile Siemens i ABB te se ti motori sada uspješno ugrađuju u standardne, zakretne podtrupne potisnike.

Sinhroni motori s permanentnim magnetima bez većih problema s hlađenjem izrađuju se i u podtrupnoj zatvorenoj izvedbi, što je posebno pogodno za podtrupne potisnike koji se hlade vodom preko kućišta.

Najveća prednost sinhronih motora s permanentnim magnetima su mala težina i promjer po čemu su najbolji među propulzijskim motorima koji se danas mogu naći na tržištu.

Osnovni im je nedostatak vrlo visoka cijena kao posljedica vrlo skupih NdFeB permanentnih magneta. Zbog velikih magnetskih sila demontiranje elektromotora s permanentnim magnetima je neizvedivo u pogonskim uvjetima. Sinhroni motori s permanentnim magnetima ugrađeni u SSP potisnike rade u poduzbuđenom području s  $\cos\Phi=0,9$  tako da se ne mogu napajati iz sinkrokonvertora već se koriste u kombinaciji s ciklokonvertorom ili širinsko-impulsno moduliranim (ŠIM) pretvaračima frekvencije.

Eksploatacijski gledano najpovoljnije rješenje za električnu propulziju su podtrupni potisnici azipodi, a u njima nisu poželjni motori koji nakon ugradnje moraju ostati dostupni za održavanje zbog npr. sustava za hlađenje ili uzbudu, jer povećavaju dimenzije, a time i hidrodinamičku efikasnost azipoda. Za podtrupne potisnike su eksploatacijski gledano najbolje rješenje Sinhroni motori s permanentnim magnetima. Zbog mnogo niže cijene kod malih snaga treba ipak razmotriti i asinhronne motore. Izvedba s ugrađenim propulzijskim elektromotorima je zastarjela, ali je česta zbog manjih investicijskih troškova te je povoljnija od podtrupnih potisnika.

Propeleri koji se najviše upotrebljavaju kod električne propulzije su propeleri s fiksnim krilima (FPP — Fix Pitch Propeller) i propeleri (vijci) s prekretnim krilima (CPP— Controllable Pitch Propeller).

### 4.3. RADOVI UNUTAR AZIPOD-A

Sve mjere opreza te inspekcije moraju biti izvršene od strane strojara i električara kvalificiranih za rad unutar Aipoda. Osobe ne samo da moraju poznavati Azipod već moraju moraju biti i fizički spremne zbog nepristupačnog terena i posla koji ne trpi pogreške.

Nekoliko važnih značajki o kojima treba posebno voditi računa u slučaju radova unutar Azipoda:

- Odrediti odgovarajuće radno mjesto;
- Isključiti i osigurati se protiv rekonekcije el. energije;
- Mjere protiv bilo kojih drugih “živih” dijelova;
- Poduzeti posebne mjere opreza blizu golih vodiča;
- Potvrditi da je instalacija isključena;
- Provesti uzemljenje i kratki spoj;
- Izdati dozvolu za rad.

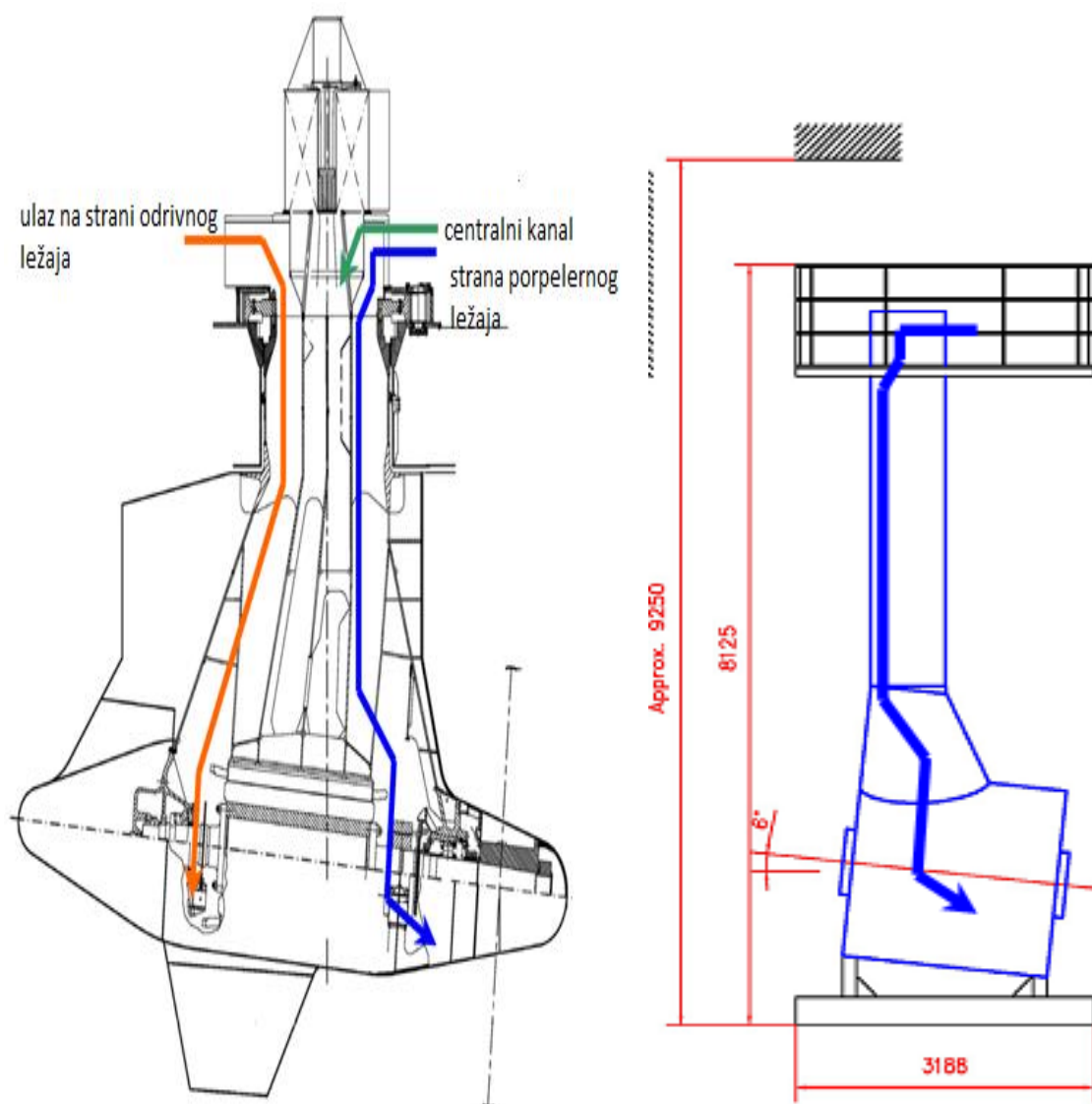
Dozvola za rad mora biti potpisana od strane kapetana, upravitelja stroja te glavnog broskog električara, također Azipod mora biti dobro izventiliran te što dublje unutar gondole izmjerena koncentracija otrovnih plinova. Osoba koja ulazi unutra mora imati prenosni sensor količine kisika sa zvučnim alarmom, te mora biti postavljeno sigurnosno uže sa opremom za izvlačenje ozlijeđene osobe ili osobe bez svijesti.

Osobama kvalificiranim za rad na Azipodu se smatraju:

- Osobe upoznate s prostorom Azipoda;
- Osobe koje poznaju prvu pomoć;
- Obučeni napraviti imobilizaciju vratne kralježnice;
- Ne prevelike osobe;
- Fizički spremne osobe;
- Osobe koje se ne boje fizičkog kontakta;
- Tehnički svjesne, obučene osobe.



Slika 13, prikazuje usporedbu stvarnog Azipod-a sa simulatorom Azipod-a napravljenog za potrebe uvježbavanja brodske posade.

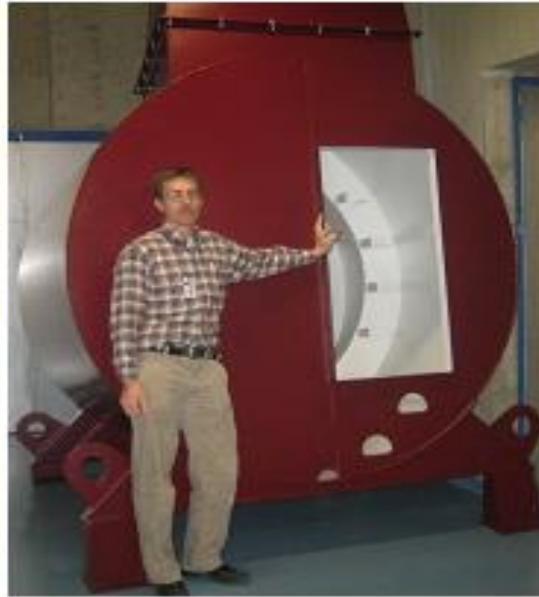


Slika 13. Shema Azipod-a i trening simulatora

Slike 14. i 15. prikazuju simulator Azipod-a te usporedbu veličine prosječnog čovjeka i Azipod-a.



**Slika 14. Simulator azipoda**



**Slika 15. Simulator azipoda**

#### **4.4. PROTUPOŽARNI SUSTAVI**

Azipod stojarnica koristi vodenu maglicu kojoj je pritisak 160 bara a aktivira se ručno izvan stojarnice te daljinski iz kontrolne sobe ili sigurnosnog centra. Časnik straže je u potpunosti autoriziran, od strane upravitelja stroja, uputiti sustav gašenja požara vodenom maglicom.

Sama gondola Azipoda ima CO<sub>2</sub> sustav protupožarne zaštite. Uputni ventil ovog sustava se također nalazi izvan Azipod stojarnice dok se cilindri nalaze u posebnoj prostoriji nekoliko paluba iznad. Prilikom puštanja CO<sub>2</sub> sustava potrebno je prebrojati svu posadu stroja, zatvoriti vodonepropusna vrata, dok će se ventilacija i zaklopke same ugasiti otvaranjem kabineta pilot uputnika. Posebni zvučni alarm je instaliran kod gašenja s CO<sub>2</sub>. Upravitelj stroja je osoba zadužena za ispuštanje CO<sub>2</sub> ili prvi časnik do njega ako je on spriječen. U Azipod stojarnici nalazi se i nekoliko prenosnih CO<sub>2</sub> aparta za gašenje požara.

## 5. PROJEKTNI INDEKS ENERGETSKE UČINKOVITOSTI BRODA (EEDI)

Energetska učinkovitost i ekološka prihvatljivost su danas među najčešće korištenim pojmovima u brodskom strojarstvu. Često se ti pojmovi smatraju istoznačnicama pa je potrebno dati jasnu razliku između ta dva pojma. Energetska učinkovitost broda je relativni odnos utrošene energije i gospodarskog ekvivalenta kojeg brod mora ostvariti u eksploataciji. Projektni indeks energetske učinkovitosti (eng. „Energy Efficiency Design Index“ – EEDI) se temelji na izravnoj vezi između količine potrošnje goriva (ugljikovodika) i ekvivalentne emisije CO<sub>2</sub>. Količina utrošene energije na brodu ovisi o energetske značajkama broskog energetske sustava (BES-a). BES je sustav zadužen za proizvodnju i opskrbu energijom svih brodskih potrošača energije. Energetske značajke BES-a mogu se podijeliti u sljedeće skupine:

- energetske značajke prvopokretača,
- energetske značajke potrošača energije,
- energetske značajke prijenosa i pohrane energije.

U energetske značajke prvopokretača ubrajamo količinu proizvedene energije pri određenoj specifičnoj potrošnji goriva i uz određenu količinu proizvedenih štetnih tvari. Prvopokretači su strojevi (motori s unutrašnjim izgaranjem, parno-turbinsko postrojenje, plinsko-turbinsko postrojenje, vjetroturbine i dr.) i uređaji (gorivni članci, fotonaponski članci, baterije i dr.) koji pretvaraju primarne oblike energije (fosilna goriva, sunce, vjetar i dr.) u mehaničku ili električnu energiju. Pod energetske značajkama potrošača energije podrazumijeva se količina i oblik energije koju određenom potrošaču treba dovesti kako bi se mogla ispuniti njegova zadaća, kao i korisnost pretvorbe energije.

## 5.1. PRISTUP OCJENI ENERGESKE UČINKOVITOSTI – EEDI

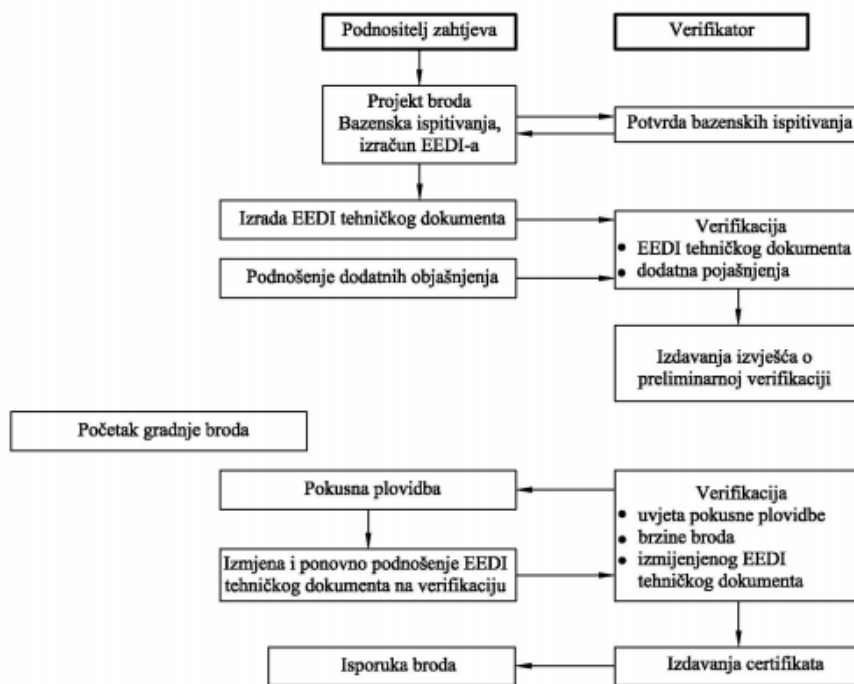
Nakon provedenih brojnih studija kojima je cilj bio odrediti mjere smanjenja emisije stakleničkih plinova, Odbor za Zaštitu Pomorskog Okoliša (eng. Marine Environment Protection Committee - MEPC) je donio rezolucijom 203(62) [30] izmjene MARPOL-a kojima je Prilogu VI dodano poglavlje 4 pod naslovom: „Pravila za energetske učinkovitost brodova“. Prepoznata namjera tog poglavlja je povećanje energetske učinkovitosti brodova primjenom projektnih i operativnih mjera koje bi rezultirale smanjenjem emisija svih čestica nastalih izgaranjem goriva, uključujući i onih već reguliranih Prilogom VI.

Također tim poglavljem želi se potaknuti razvoj i primjena inovativnih energetske učinkovitih tehnologija. Tim se izmjenama uvodi Projektni indeks energetske učinkovitosti (eng. Energy Efficiency Design Index – EEDI) i Brodski plan upravljanja energetske učinkovitosti (eng. Ship Energy Efficiency Management Plan - SEEMP). Brodu koji udovoljava zahtjevima EEDI-a i SEEMP-a izdaje se Međunarodna svjedodžba energetske učinkovitosti (eng. International Energy Efficiency Certificate – IEE Certificate).

SEEMP je operativna mjera povećanja energetske učinkovitosti. Svaki brod u međunarodnoj plovidbi čiji je kapacitet 400 GT ili veći mora imati SEEMP prisutan na brodu i razvijen u skladu sa smjernicama. EEDI je projektna mjera povećanja energetske učinkovitosti koja se primjenjuje samo za nove brodove (ili za brodove na kojima je napravljena preinaka). Za te je brodove potrebno izračunati Postignuti EEDI (eng. Attained EEDI) koji ne smije biti veći od Zahtijevanog EEDI-a (eng. Required EEDI).

## 5.2. OCJENA ENERGETSKE UČINKOVISTOSTI BRODA WESTERN BERGEN

Za proračun i analizu Projektnog indeksa energetske učinkovitosti (EEDI) korišteni su podaci već sagrađenog broda Western Bergen. Zbog te činjenice izostala je mogućnost da se simulira kompletan postupak verifikacije EEDI-a u svrhu izdavanja (dobivanja) Međunarodnog certifikata energetske učinkovitosti (IEEC). Naime, dijagramom toka predviđeno je da postupak verifikacije započinje u fazi pretprojekta i da se brodu prije početka gradnje izda preliminarno Izvješće kojim se potvrđuje da brod udovoljava pravilima o energetske učinkovitosti broda. IEEC se izdaje tek nakon što se pokusnom plovidbom potvrde projektom predviđene vrijednosti parametara koje utječu na vrijednost EEDI-a.



Slika 16. Dijagram toka u postupku izdavanja IEEC-a [11]

Prema smjernicama za proračunski algoritam, određivanje EEDI-a ima oblik :

$$EEDI = \frac{\left( \prod_{j=1}^M f_j \right) \left( \sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE^*})}{f_i \cdot f_c \cdot Nosivost \cdot f_w \cdot V_{ref}} +$$

$$+ \frac{\left( \left( \prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{AE_{eff}(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right) - \left( \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME^{**}} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot Nosivost \cdot f_w \cdot V_{ref}}$$

gdje su:

$P_{ME}$  75 %  $P_{MCR}$  (maksimalne trajne snage) instaliranih glavnih motora nakon oduzimanja snage vratilnih generatora, kW,

$P_{AE}$  snaga pomoćnih motora potrebna isključivo za podmirenje energetske potreba sustava propulzije i potrebe smještaja pri normalnom stanju plovidbe, kW,

$P_{PTI}$  75 % nominalne snage instaliranih vratilnih motora podijeljenog s prosječnim stupnjem korisnosti dizel-električnih agregata, kW,

$P_{AE_{eff}}$  smanjenje snage pomoćnih motora zbog inovativnih, energetski efikasnih, električnih tehnologija, kW,

$P_{eff}$  doprinos inovativnih, energetski efikasnih, mehaničkih tehnologija pri 75 %  $P_{MCR}$  glavnog motora, kW,

$C_F$  koeficijent pretvorbe goriva u CO<sub>2</sub>, kg CO<sub>2</sub>/kg goriva

SFC specifična potrošnja goriva, g/kWh,

$f_j$  korekcijski faktor zbog posebnih konstrukcijskih značajki broda, bezdimenzijski,

$f_i$  faktor smanjene nosivosti, bezdimenzijski,

$f_c$  korekcijski faktor smanjene zapremine, bezdimenzijski,

$f_w$  faktor stanja mora, bezdimenzijski,

$f_{eff}$  faktor dostupnosti inovativnih energetski efikasnih tehnologija, bezdimenzijski,

$V_{ref}$  brzina koja se pri  $P_{ME}$  može postići pri punoj nosivosti, čv.

Nosivost je za brodove za prijevoz rasutog tereta izražena kao DWT. Indeksi  $i_{ME}$  i  $i_{AE}$  se odnose na glavne, odnosno pomoćne motore.

### **5.2.1. OPĆE ZNAČAJKE MOTORNOG BRODA WESTERN BERGEN**

#### **Ime broda: Western Bergen**

DNV klasa: I+HULL+MACH Bulk Carrier DNV, SINGAPORE FLAG BLT 12, SDBC, 53,464 SDWT ON 12.600 M TPC MT, 5 HOLDS / 5 HATCHES, GRAIN/BALE 65,945/M3, GRD 4 x 36 TS, GRAB 4 X 12 CBM LOA/BM 190.00 / 32.26 M, GRT/NRT 32,578/18,070 Unrestricted navigation + AUT-UMS MON- Bulk Carrier ESP BC-A HCS HME 2,4 IWS SD,1 AUT1

IMO broj: 9715816

Pozivni znak: 9V2861

MMSI broj: 566164000

Nacionalnost: Singapur

Godina gradnje: 2015

Datum porinuća: 02/20/2015

**Tablica 3. Tehničko ekonomske značajke broda [11].**

Duljina preko svega, <i>LOA</i>	198 m
Duljina između okomica, <i>LPP</i>	183,05 m
Širina, konstruktivna, <i>B</i>	32,26 m
Visina, konstruktivna, <i>H</i>	17,50 m
Gaz na ljetnoj vodnoj liniji, najveći, <i>Tmax</i>	12,94 m
Nosivost pri tom gasu (DWT)	60,319 t
Masa broda (LWT)	11,000 t
Bruto tonaža	34349 GT
Brzina na pokusnoj plovidbi	oko 14,0 čv

U brod je ugrađen jedan dizelski motor Wärtsilä 5RT-flex50-D-5 proizveden u tvornici dizelskih motora „Winterthur Gas & Diesel Ltd.“.

**Tablica 4. Značajke pogonskog (glavnog) motora [11].**

Proizvođač	Winterthur Gas & Diesel Ltd.
Vrsta motora	Dizelski, dvotaktni, sporokretni
Tipaska oznaka motora	Wärtsilä 5RT-flex50-D-5
<b>Maksimalna trajna snaga (PMCR) / broj okretaja</b>	<b>8300 kW / 124 o/min</b>
<b>Trajna eksploatacijska snaga (PCSR)</b>	<b>7055 kW (85% PMCR)</b>
Broj cilindara	5
Promjer cilindra	500 mm
Hod stapa	2050 mm
Testni ciklus	E3
SFC pri 75 % <i>PMCR</i> , nekorigirano	-
SFC pri 75 % <i>PMCR</i> , korigirano na ISO uvjete	171,0 g/kWh
Broj pogonskih motora	1
Vrsta goriva (na probnom stolu proizvođača)	brodsko lako dizelsko gorivo (MDO)

Pogonski motor je brodski, dizelski, sporokretni, reverzibilni, dvotaktni motor, s križnom



glavom. Motor se upućuje komprimiranim zrakom tlaka 21 bar. Trajna eksploatacijska snaga motora (Continuous service rating CSR) iznosi 85%  $PMCR$ , tj. 7055 kW.

Motor je predviđen da koristi teško dizelsko gorivo viskoznosti do 700 cSt pri 50 °C u svim uvjetima, tj. pri pokretanju, zaustavljanju, manevrima, kao i pri plovidbi otvorenim morem.

Garantirana specifična potrošnja goriva na probnom stolu pri 100 %  $P_{MCR}$  iznosi 173,3 g/kWh u uvjetima prema ISO 3046/3-2006 (1000 mbar okolišni tlak, 25 °C temperatura okoliša) za gorivo donje ogrjevne vrijednosti 42 700 kJ/kg.

Za pogon tri (3) elektro-agregata koriste se tri (3) dizelska motora Daihatsu Diesel 6DK-20, svaki maksimalne trajne snage 800 kW kod 720 o/min.

Motori su brodski, dizelski, s turbonabijanjem, četverotaktni, jednoradni, hladjeni slatkom vodom i predviđeni da mogu koristiti teško dizelsko gorivo (HFO) do 700 cSt pri 50 °C kao i glavni motor.

**Tablica 5. Značajke pomoćnih dizelskih motora [11].**

Proizvođač	DAIHATSU DIESEL MFG. CO. LTD.
Vrsta motora	Dizelski, četverotaktni, srednjekretni
Tipaska oznaka motora	Daihatsu Diesel 6DC-17
Maksimalna trajna snaga ( $PMCR$ ) / broj okretaja	560 kW / 900 o/min
Testni ciklus	D2
SFC pri 50 % $PMCR$ , nekororigirano	-
SFC pri 50 % $PMCR$ , korigirano na ISO uvjete	200 g/kWh
Komada	3
Vrsta goriva (na probnom stolu proizvođača)	brodsko lako dizelsko gorivo (MDO)

Instalirana su tri generatora električne energije koje pokreću pomoćni dizelski motori. Generatori su predviđeni za paralelni rad. Regulacija napona je automatska i osigurava da napon u svim režimima rada bude unutar 2,5 % nazivnoga.

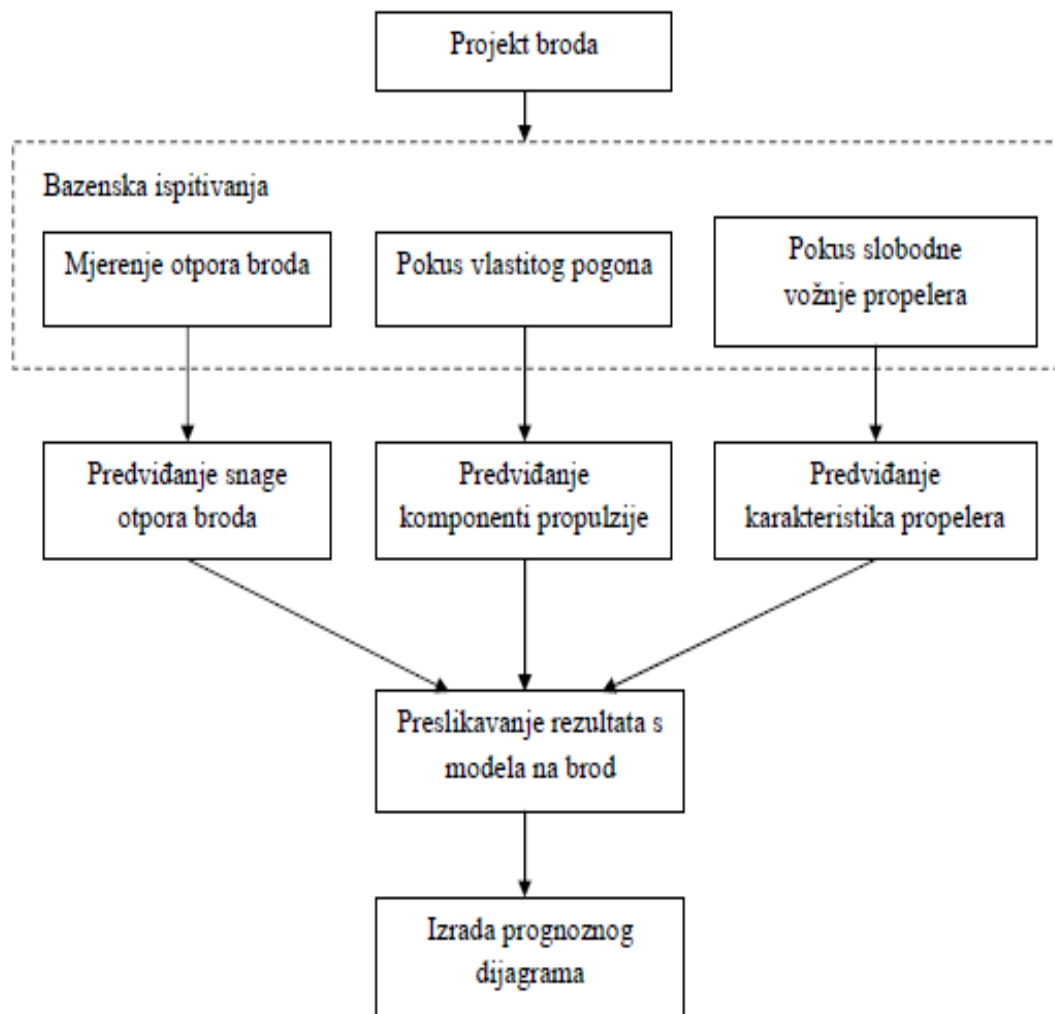
**Tablica 6. Značajke generatora električne energije [11]**

Proizvođač	DAIHATSU DIESEL MFG. CO. LTD.
Nazivna snaga , $P_N$ (kVA) / broj okretaja	900 kVA (720 kW) / 720 o/min
Frekvencija	60 Hz
Napon	AC 450 V, 3-fazni
Komada	3

### 5.3. PRORAČUN EEDI-A

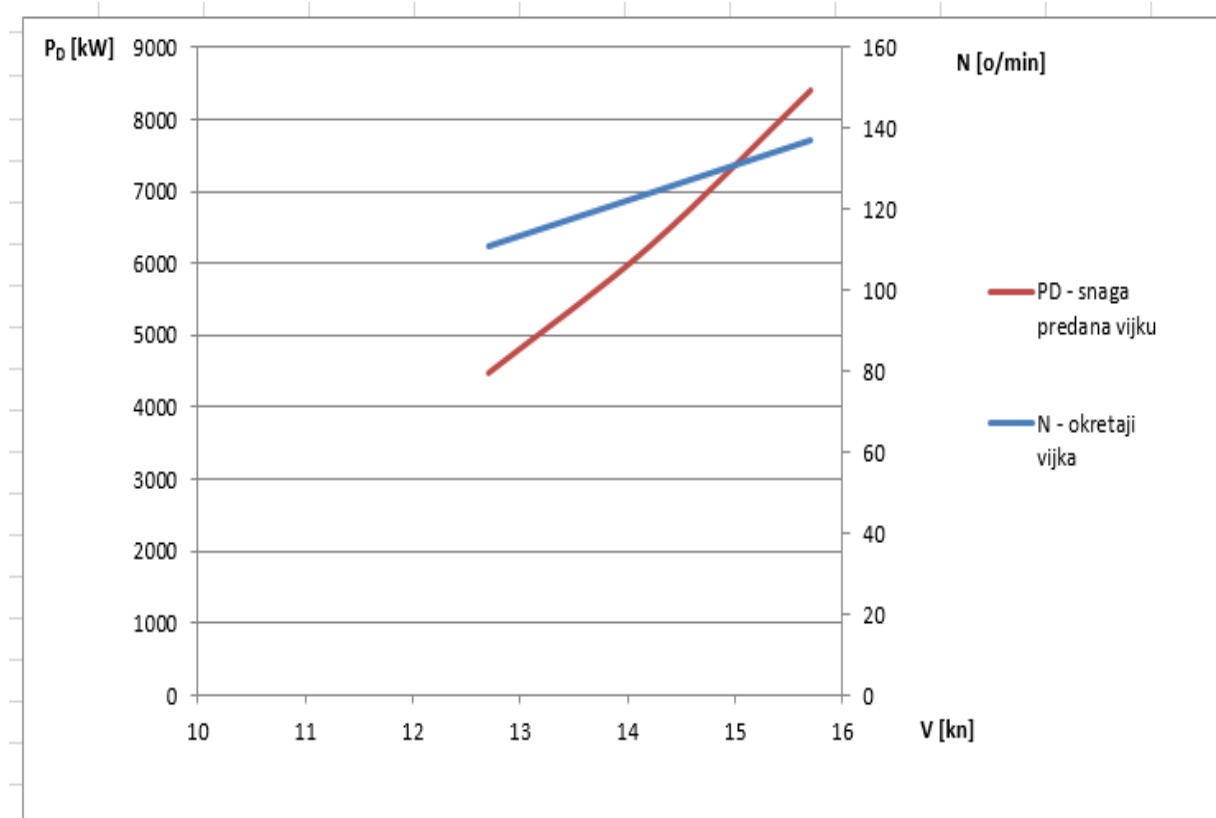
Modelska ispitivanja su provedena za sličan brod Western Bergen. Provedena su sljedeća modelska ispitivanja:

- pokus slobodne vožnje propelera,
- mjerenje otpora broda (pri projektnom gasu, teškom balastu, lakom balastu i pri najvećem gasu),
- pokus vlastitog pogona (pri projektnom gasu, teškom balastu, lakom balastu i pri najvećem gasu),



**Slika 17. Dijagram toka predviđanja krivulja snage [11].**

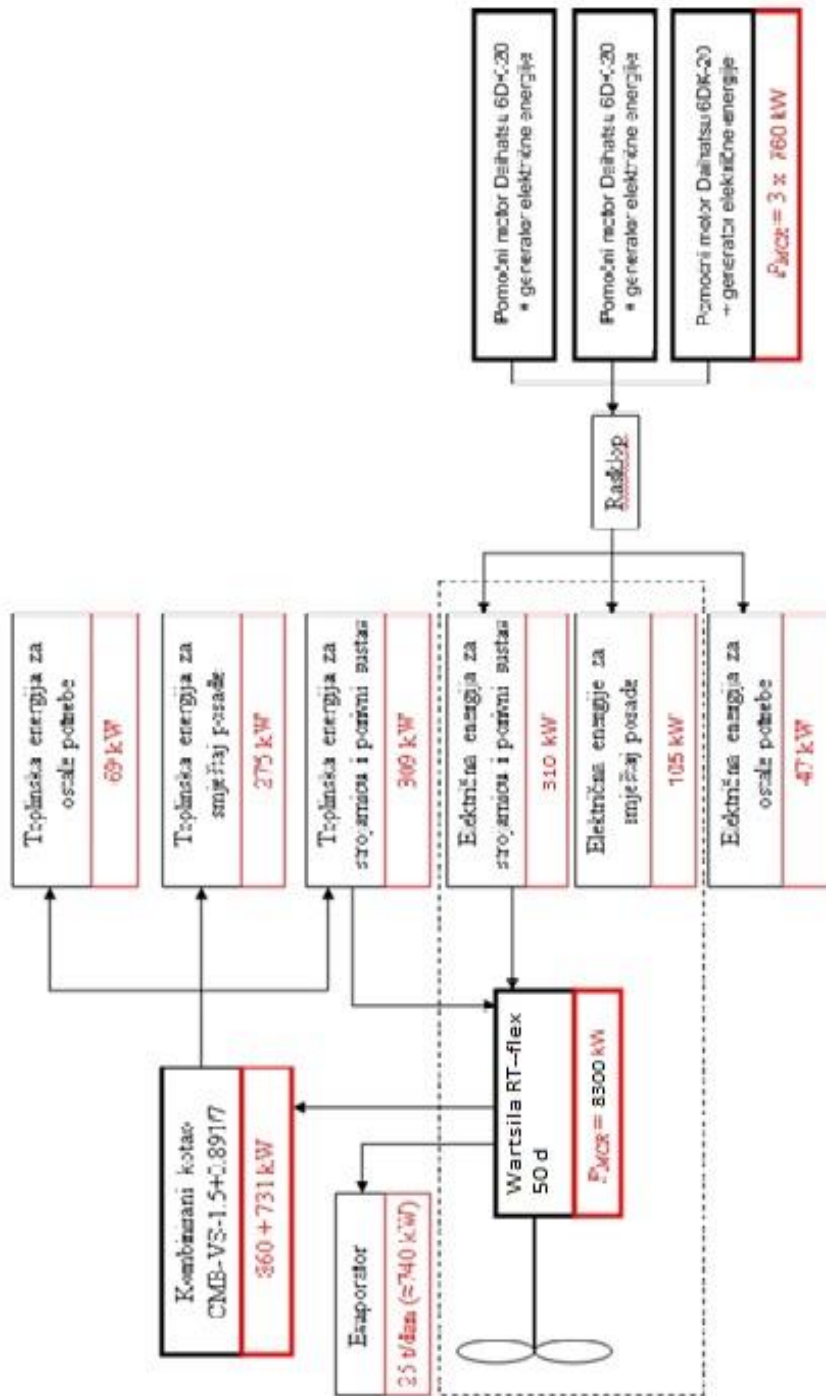
Na temelju podataka modelskih ispitivanja izrađen je prognozni dijagram broda. Predviđena brzina broda pri 75 %  $P_{MCR}$  pri najvećem gasu  $T=12,94$  m iznosi 14,2 čv.



**Slika 18. Prognozni dijagram pri najvećem gasu (modelska ispitivanja) [11]**

Analiza prognoznog dijagrama pokazuje da su odstupanja od rezultata s pokusne plovidbe najmanja kod modelskih ispitivanja u bazenu. Stoga se rezultati dobiveni tom metodom smatraju valjanima te se na temelju njih predviđa brzina koju bi brod mogao postići pri najvećem gasu. Budući da je brod na pokusnoj plovidbi postigao brzinu za 0,03 čv manju od predviđene, za isti iznos se smanjuje i predviđanje brzine pri najvećem gasu. Iz toga proizlazi da bi brod, pri uvjetima koje propisuje metodologija za proračun EEDI-a, postigao brzinu od 14,2 čv.

Principijelna shema energetskog sustava broda Western Bergen prikazana je na Slici 19. Dio energetskog sustava obuhvaćenog proračunom EEDI-a je označen crtkanim pravokutnikom.



Slika 19. Principijelna shema energetskog sustava broda Western Bergen [11]

## 5.4. IZRAČUN EEDI-A

### Osnovni podaci

Vrsta broda	Nosivost (DWT)	Brzina $v_{ref}$ (čvor)
Brod za rasuti teret	60300 t	14,16

### Glavni strojevi

$P_{MCR}$ (kW)	Vratilni generator	$P_{ME}$ (kW) (75% $P_{MCR}$ )	Vrsta goriva	$C_{FME}$	$SFC_{ME}$ (g/kWh)
8300	Ne postoji	6225	MDO	3,151	171,00

### Pomoćni strojevi

$P_{AE}$ (kW) (5% $P_{MCR}$ )	Vrsta goriva	$C_{FME}$	$SFC_{ME}$ (g/kWh)
415	MDO	3,151	200

### Postignuta vrijednost EEDI-a

$$\begin{aligned}
 EEDI &= \frac{(\prod_{j=1}^M f_j) (\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_c \cdot Kapacitet \cdot f_w \cdot V_{ref}} \\
 &+ \frac{((\prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{AE_{eff(i)}}) C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_c \cdot Kapacitet \cdot f_w \cdot V_{ref}} \\
 &- \frac{(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME})}{f_i \cdot f_c \cdot Kapacitet \cdot f_w \cdot V_{ref}} = \\
 &= \frac{1 \cdot 6225 \cdot 3,151 \cdot 171 + 415 \cdot 3,151 \cdot 200 + 0 - 0}{1,016 \cdot 1 \cdot 60300 \cdot 14,16 \cdot 1} = 4,192
 \end{aligned}$$

### Zahtijevana vrijednost EEDI-a

Zahtijevana vrijednost EEDI-a računa se prema:

$$\text{Zahtijevani EEDI} = a \cdot b^{-c}$$

gdje je za brodove za rasuti teret:

$$a = 961,79,$$

$$b \text{ (DWT)} = 34349 \text{ t,}$$

$$c = 0,477.$$

Iz toga slijedi da zahtijevani EEDI iznosi:

$$\text{Zahtijevani EEDI} = a \cdot b^{-c} = 961,79 \cdot 34349^{-0,477} = 6,34$$

***Indeks energetske učinkovitosti motornog broda Western Bergen zadovoljava kriterije propisane rezolucijom MEPC.203(62), Pravilo 21 (IMO, MARPOL, Prilog 6).***

## **6. ZAKLJUČAK**

Dizel električna propulzija u današnje vrijeme već pogoni većinu putničkih brodova, jer se ističe poboljšanim manevarskim sposobnostima, niskim vibracijama te

većom iskoristivosti broskog prostora. Unatoč osjetno većim troškovima pri samoj gradnji broda, dizel električna propulzija doživljava ekspanziju u različitim oblicima prvenstveno zbog rastućih cijena goriva. Dual fuel motori omogućavaju da omjer zraka i goriva bude relativno visok, oko 2,1:1 što dovodi do proizvodnje znatno niže emisije dušikovog oksida. Prema postojećim analizama dokazana je superiornost električne propulzije u iskorištavanju broskog prostora, stupnju raspoloživosti, utjecaju na okoliš, manevarskim svojstvima kod svih brzina, vrsti manevara i potrošnji goriva kod svih eksploatacijskih profila plovila. Investicijski troškovi za izgradnju broda s električnom propulzijom i zakretnim podtrupnim potisnicima u početku su mnogo viši nego kod dizel-mehaničke propulzije ali u konačnici dobivamo mnogo veću sigurnost i manju emisiju štetnih tvari brodova s električnom propulzijom. U ovom radu napravljen je proračun energetske učinkovitosti (EEDI) za brod Western Bergen te je donesen zaključak kako indeks energetske učinkovitosti zadovoljava kriterije po pravilu 21 (IMO, MARPOL).

## **LITERATURA:**

[1] Hall, D.: Practical Marine Electrical Knowledge, London, 1999

[2] Skalički, B.; Grilec, J.: Električni strojevi i pogoni, Zagreb, 2005



- [3] MAN „Diesel-Electric Propulsion Plants Engineering Guide“ ,
- [4] MAN Diesel A/S, „LNG Carriers with ME-GI Engine and High Pressure Gas Supply System“, Copenhagen, Danska, kolovoz 2009
- [5] Barend Thijssen „Dual-fuel-electric LNG carriers“, prezentacija, Wärtsilä, Finska,
- [6] Alexander Harsema-Mensonides „Dual fuel electric propulsion systems in LNG shipping“, MPT Consultancy
- [7] Wärtsilä „Wärtsilä 50 DF Project Guides“, Vaasa, Finska, rujan 2011.
- [8] Krčum Maja, Električna propulzija, Split, 2010
- [9] G. Radica, Održavanje i upravljanje brodskim postrojenjem, Pomorski fakultet, Split 2004.
- [10] Radica, Gojmir: Brodski motori, materijali sa predavanja. Split 2015.
- [11] Šestan, Ante; Energetska učinkovitost suvremenih brodskih energetskih sustava, Pomorski fakultet Split 2016.

## **POPIS TABLICA:**

Tablica 1: Proračun za određivanje kapaciteta i opterećenja motora.....	13
Tablica 2: Osnovni parametri motora.....	17

Tablica 3. Tehničko ekonomske značajke broda.....	49
Tablica 4. Značajke pogonskog (glavnog) dizleskog motora.....	49
Tablica 5. Značajke pomoćnih dizelskih motora.....	50
Tablica 6. Značajke generatora električne energije.....	51

## **POPIS SLIKA:**

Slika 1: Sastavne komponente dizel električne propulzije [1] .....	2
--	---

Slika 2: Usporedba specifične potrošnje goriva u zavisnosti od ukupne razvijene snage na osovina dizelskih motora [2].....	4
Slika 3. Sinkrokonverter [1].....	5
Slika 4. Tiristor [2].....	6
Slika 5: Tok električne struje kod propulzije i regeneracije[1] .....	10
Slika 6: Izmjenični propulzijski motor [8] .....	11
Slika 7: Maksimalno povećanje stupnja opterećenja za različite brzine vrtnje [7] .....	18
Slika 8: Učinkovitost dizelskog i dual fuel motora i emisija NOx-a pri punom opterećenju [9].....	20
Slika 9: Usporedba emisija ispušnih plinova između dizelskog i dual fuel motora [9]	21
Slika 10 Azipod sustav, glavni dijelovi [10]. .....	23
Slika 11 Azipod [10].....	24
Slika 12. Sustav električne propulzije s podtrupnim potisnicima – Azipod [10] .....	26
Slika 13. Shema Azipod-a i trening simulatora .....	35
Slika 14. Simulator azipoda	
Slika 15. Simulator azipoda .....	36
Slika 16. Dijagram toka u postupku izdavanja IEEC-a [11].....	39
Slika 17. Dijagram toka predviđanja krivulja snage [11]. .....	45
Slika 18. Prognozni dijagram pri najvećem gazu (modelska ispitivanja) [11].....	46
Slika 19. Principijelna shema energetskog sustava broda Western Bergen [11] .....	47