

# Modeliranje brodskih pomoćnih sustava s gledišta sigurnosti poriva broda

---

**Martinović, Dragan**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2009**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:188:116111>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-05-14**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka Library - SVKRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

POMORSKI FAKULTET U RIJECI

Mr. sc. Dragan Martinović

**MODELIRANJE BRODSKIH POMOĆNIH SUSTAVA S  
GLEDIŠTA SIGURNOSTI PORIVA BRODA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

RIJEKA, 2009.



# SAŽETAK

Suvremeni dizelski porivni sustav, danas zastupljen na većini trgovačkih brodova, predstavlja iznimno složen brodski strojni kompleks koji se sastoji iz niza međusobno povezanih i ovisnih podsustava, s izravnim utjecajem na pouzdanost i sigurnost broda u cjelini. Stoga se zahtijeva visok stupanj efikasnosti i raspoloživosti svih porivnih procesa.

U svjetskoj trgovačkoj floti osobito značajno mjesto zauzima poriv baziran na dvotaktnom sporookretnom prekretnom dizelskom motoru i fiksnom brodskom vijku kao dominantnom propulzoru. Kvarom na sustavu primarne proizvodnje električne energije, odnosno dizelskim generatorima te prijelazom na opskrbu električnom energijom u nuždi, brod ostaje bez poriva i nemoguća je njegova ponovna uspostava, iako je porivni stroj u ispravnom stanju. Iz analize relevantnih svjetskih baza podataka o kvarovima u brodskom strojnom kompleksu, vidljivo je da su najčešći kvarovi upravo na dizelskim motorima koji pokreću generatore. Stoga je potrebno definirati model ponovne uspostave poriva, neovisan o primarnoj električnoj energiji, čime bi se značajno povećala sigurnost poriva broda.

Istraživanje razvojnih projekata sustava inteligentne strojarnice ukazuje na mogućnost postavljanja modela uspostave poriva korištenjem hidraulike inteligentnog motora i uvođenjem u sustav hidrogeneratora. Analizirane su i druge mogućnosti, od povećanja snage generatora u nuždi preko dodatnog kapaciteta akumulatorskih jedinica, do ugradnje privješanih pumpi na sporookretni prekretni porivni motor. Nakon temeljite analize prevladao je model pouzdanog pogona s osovinskim generatorom i uzbudnim motorom kojim je moguće uspostaviti poriv nakon potpunog otkazivanja sustava primarne proizvodnje električne energije i plovidba broda na vlastiti pogon. Time je definiran model brodskog pomoćnog sustava s gledišta sigurnosti poriva broda.

## Ključne riječi

Poriv, dizelski motor, energija, generator, zalihost, inteligentna strojarnica, uzbudni motor, kvar, upravljanje, model, simulacija, uspostavljanje poriva.

# **MODELLING SHIP'S AUXILIARY SYSTEMS IN TERMS OF THE SHIP'S PROPULSION SAFETY**

## **Abstract**

Modern diesel propulsion system, which is nowadays being used on board the majority of merchant ships, represents an exceptionally complex ship's machinery system, consisting of a number of interconnected and interdependent subsystems, directly affecting reliability and safety of the ship in general. Therefore, a high performance and a high level of availability of all propulsion systems is required.

A prominent role in the global merchant fleet is played by the propulsion based on the two-stroke low-speed reversing diesel engine and on the fixed propeller as a dominant propulsor. Due to the electrical energy primary production system failure or to the diesel generators failure, followed by the switchover to the emergency supply of electrical energy, the ship runs out of propulsion, which cannot be restored in spite of the proper functioning of the main engine. Out of the analysis of relevant global databases on ship's machinery failures, it is obvious that the most frequent failures occur precisely on the generator-running diesel engines. Therefore, it is necessary to define a propulsion restoration model which would not depend on the primary electrical energy, thus increasing considerably the ship's propulsion safety.

A research carried out on intelligent ship's machinery development projects has pointed out a possibility of setting up a propulsion restoring model by using the intelligent engine hydraulics and by introducing hydro generators into the system. Further possibilities have been also analyzed, from the increase of the emergency generator power, over the additional capacity of the accumulator units to the installation of pumps attached to low-speed reversing propulsion engine. Following a thorough analysis, a reliable drive model has prevailed, based on the use of a shaft generator and an excitation engine, thus enabling the propulsion restoring subsequent to a total failure of the electrical energy primary production system, and to the self-propelled ship navigation. As a result of, a model of the ship's auxiliary system has been defined in terms of the ship's propulsion safety.

## **Keywords**

Propulsion, diesel engine, energy, generator, redundancy, intelligent machinery, excitation engine, failure, drive, model, simulation, propulsion restoring.

## **PODACI I INFORMACIJE O DOKTORANDU**

1. Ime i prezime: DRAGAN MARTINOVIĆ
2. Datum i mjesto rođenja: 14. lipnja 1957. u Ljubljani, Slovenija.

3. Naziv završenog fakulteta i godina diplomiranja: TEHNIČKI FAKULTET U RIJECI, 1982.
4. Naziv poslijediplomskog studija i godina magistriranja: UPRAVLJANJE SUSTAVIMA BRODA, POMORSKI FAKULTET U RIJECI, 1997.
5. Naslov magistarskog rada: ANALIZA I IZBOR RASHLADNOG SUSTAVA BRODA

### **INFORMACIJE O DOKTORSKOJ DISERTACIJI**

1. Naslov disertacije: **MODELIRANJE BRODSKIH POMOĆNIH SUSTAVA S GLEDIŠTA SIGURNOSTI PORIVA BRODA**
2. UDK: **629.5.06(043.3)**  
**621.436:629.5.03(043.3)**
3. Fakultet na kojem je disertacija obranjena: POMORSKI FAKULTET U RIJECI, Sveučilište u Rijeci.

### **POVJERENSTVA, OCJENA I OBRANA DISERTACIJE**

1. Datum prihvaćanja teme: 12. lipnja 2006.
2. Mentor: Dr.sc. Enco Tireli, redoviti profesor Pomorskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci.
3. Povjerenstvo za ocjenu disertacije:
  - 1) Dr. sc. Ante Bukša, docent Pomorskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, predsjednik.
  - 2) Dr.sc. Enco Tireli, redoviti profesor Pomorskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, član.
  - 3) Dr. sc. Željko Kurtela, docent Odjela za pomorstvo Sveučilišta u Dubrovniku, član.
4. Povjerenstvo za obranu disertacije:
  - 1) Dr. sc. Ante Bukša, docent Pomorskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, predsjednik.
  - 2) Dr.sc. Enco Tireli, redoviti profesor Pomorskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, član.

3) Dr. sc. Željko Kurtela, docent Odjela za pomorstvo Sveučilišta u Dubrovniku, član.

5. Datum obrane disertacije: **05. lipnja 2009.**

# SADRŽAJ

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. UVOD.....                                                                                    | 4  |
| 1.1.    Postavljanje problema.....                                                              | 4  |
| 1.2.    Cilj istraživanja.....                                                                  | 5  |
| 1.3.    Dosadašnja znanstvena istraživanja.....                                                 | 6  |
| 1.4.    Metode znanstvenog istraživanja.....                                                    | 7  |
| 1.5.    Kompozicija rada .....                                                                  | 8  |
| 2. ENERGETSKE POTREBE BRODA.....                                                                | 12 |
| 2.1.    Uvod .....                                                                              | 12 |
| 2.1.1.    Otpor i propulzija .....                                                              | 13 |
| 2.1.2.    Brodski vijak .....                                                                   | 14 |
| 2.1.3.    Određivanje snage poriva.....                                                         | 17 |
| 2.2.    Tehnički odabir pogonskog stroja .....                                                  | 20 |
| 2.3.    Brodski porivni dizelski motor.....                                                     | 29 |
| 2.4.    Primjena porivnih dizelskih motora u pomorstvu.....                                     | 33 |
| 2.5.    Model suvremenog broskog poriva .....                                                   | 35 |
| 2.6.    Zalihost poriva broda .....                                                             | 36 |
| 2.6.1.    Propisi koji se odnose na sustav poriva broda .....                                   | 36 |
| 2.6.2.    Zalihost broskog porivnog stroja.....                                                 | 38 |
| 2.7.    Električna energija na brodu. ....                                                      | 41 |
| 3. INTELIGENTNA STROJARNICA.....                                                                | 45 |
| 3.1.    Faze razvoja sustava .....                                                              | 45 |
| 3.1.1.    Pojam inteligencije, “inteligentnog broda” i “intelig. motora” .....                  | 46 |
| 3.1.2.    Djelovanje pojedinih sustava “intelig. motora” i njihov utjecaj na ekonomičnost ..... | 49 |
| 3.2.    Koncept i prednost “inteligentnog motora” .....                                         | 51 |
| 3.2.1.    Osnovni sustavi “inteligentnog motora” .....                                          | 53 |
| 3.2.2.    Sustavi “inteligentnog” ubrizgavanja goriva i upravljanja ispuš. ventilima .....      | 56 |
| 3.2.3.    Samodijagnostički procesi u višeprocenom sustavu.....                                 | 63 |
| 4. SIGURNOST POGONA PORIVNOG MOTORA S GLEDIŠTA OPSKRBE ELEKTRIČNOM ENERGIJOM .....              | 66 |
| 4.1.    Sustavi porivnog dvotaktnog dizelskog motora .....                                      | 66 |
| 4.2.    Sustav morske vode .....                                                                | 69 |
| 4.3.    Sustav slatke vode.....                                                                 | 73 |

|        |                                                                               |     |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.4.   | Sustav podmazivanja .....                                                     | 79  |
| 4.5.   | Sustav goriva .....                                                           | 83  |
| 4.6.   | Sustav pare.....                                                              | 86  |
| 4.7.   | Sustav zraka za upućivanje porivnog stroja.....                               | 88  |
| 5.     | POUZDANOST I RASPOLOŽIVOST BRODSKOG PORIVA .....                              | 89  |
| 5.1.   | Pouzdanost .....                                                              | 90  |
| 5.2.   | Održavanje sustava .....                                                      | 95  |
| 5.3.   | Pouzdanost sustava.....                                                       | 98  |
| 5.4.   | Analiza baza podataka kvarova poriva broda .....                              | 100 |
| 5.4.1. | Baza podataka CIMAC .....                                                     | 100 |
| 5.4.2. | Baza Japanskog komiteta za sigurnost broda – JSRIC.....                       | 102 |
| 5.4.3. | Baza podataka Švedskog osigurava. zavoda – Swedish Club ....                  | 105 |
| 5.4.4. | Baza podataka NK .....                                                        | 108 |
| 6.     | UTJECAJ ELEKTRIČNE ENERGIJE NA POUZDANOST I SIGURNOST<br>BRODSKOG POGONA..... | 112 |
| 6.1.   | Dizelski generator .....                                                      | 114 |
| 6.1.1. | Utjecaj dizelskog generatora na sigurnost brodskog poriva .....               | 120 |
| 6.2.   | Osovinski generator .....                                                     | 124 |
| 6.2.1. | Utjecaj osovinskog generatora na sigurnost brodskog pogona ...                | 131 |
| 6.3.   | Turbogenerator .....                                                          | 132 |
| 6.3.1. | Utjecaj turbogeneratora na sigurnost brodskog pogona .....                    | 134 |
| 6.4.   | Izvor električne energije u nuždi.....                                        | 135 |
| 7.     | MODEL BRODSKOG POMOĆ. SUSTAVA ZA SIGURAN PORIV BRODA ..                       | 136 |
| 7.1.   | Stanja brodskog sustava.....                                                  | 136 |
| 7.2.   | Automatizirana proizvodnja električne energije.....                           | 138 |
| 7.3.   | Analiza ishodišta za postavljanje modela sigur. brodskog pogona .             | 140 |
| 7.3.1. | Model pogona s tri dizelska generatora.....                                   | 140 |
| 7.3.2. | Model pogona s dizelskim generat. i osovinskim generatorom ...                | 144 |
| 7.3.3. | Model pogona s turbogeneratorom .....                                         | 146 |
| 7.4.   | Pouzdanost pogona .....                                                       | 148 |
| 7.5.   | Procjena sadašnjeg stanja.....                                                | 151 |
| 7.6.   | Model povećanja pouzdanosti s povećanjem broja generatora .....               | 157 |
| 7.7.   | Povećanje pouzdanosti poboljšanjem elemenata unutar sustava...                | 161 |
| 7.7.1. | Ugrađivanje akumulatora.....                                                  | 161 |
| 7.7.2. | Ugradnja privještenih pumpi i hidrogeneratora.....                            | 163 |
| 7.7.3. | Model pomoćne propulzije s osovinskim generatorom.....                        | 168 |

|        |                                                             |     |
|--------|-------------------------------------------------------------|-----|
| 7.8.   | Model pouzdanog pogona .....                                | 172 |
| 7.8.1. | Model predlaganog pogona.....                               | 173 |
| 7.8.2. | Kvar dizelskog generatora tijekom poriva.....               | 177 |
| 7.8.3. | Model upravljanja i opterećenja predloženog rješenja.....   | 180 |
| 7.9.   | Uspostavljanje poriva.....                                  | 182 |
| 7.10.  | Simulacija predloženog modela alternativne propulzije ..... | 185 |
| 8.     | ZAKLJUČAK .....                                             | 189 |
|        | POPIS SLIKA.....                                            | 192 |
|        | POPIS TABELA .....                                          | 195 |
|        | LITERATURA .....                                            | 196 |

## 1. UVOD

### 1.1. Postavljanje problema

Istraživanja su dokazala da je najvažniji zahtjev brodskog porivnog sustava njegov besprijekoran rad, budući da njegovo zakazivanje ugrožava korisničku djelotvornost i sigurnost broda. Čimbenici međunarodnog pomorstva izloženi su pojačanoj troškovnoj neizvjesnosti i žestokoj konkurenciji, zbog čega su prisiljeni stalno povećavati kvalitetu usluga uz istovremeno smanjivanje efektivnih troškova. Kako na sigurnost broda i njegovo funkcioniranje uglavnom utječu tehnologija broda i posada, a zbog visokih troškova koje brodovlasnik ima na račun posade, prisutan je stalni trend smanjivanja broja članova posade. Pored toga, kod modernih brodskih sustava, članovima posade je teško steći potrebnu stručnost u održavanju, jer je nije lako prenijeti sa čovjeka na čovjeka. S druge strane stalno uvođenje novih tehnoloških rješenja kod projektiranja brodova još više otežava adekvatno održavanje.

Mogući kvar i otkazivanje rada pomoćnih motora dovodi do ozbiljnog ugrožavanja sigurnosti broda. U mnogim slučajevima cijena prekida procesa zbog kvara uređaja može mnogostruko premašiti investicijsku cijenu samog uređaja. Posljedica takvog stanja je zaustavljanje poriva broda iako je generator za nuždu u radu, a brod pluta prepušten vanjskim uvjetima na koje posada ne može utjecati. Dijagnosticira se elektroenergetsko postrojenje, koje obuhvaća ispitivanje procesne opreme i postrojenja za proizvodnju, razdiobu i pretvorbu električne energije (pogonske strojeve, generatore, prekidače, pretvarače, motore, itd.) i čeka se na osposobljavanje dizelskog generatora, koje može potrajati nepredviđeno dugo, a ponekad se brod mora tegliti do prve luke.

Umjesto zahtjeva za tegljenjem broda, budući da nema proizvodnje električne energije, može se predvidjeti sustav koji će automatski napajati sve neophodne uređaje pomoćnih sustava porivnog motora i time omogućiti poriv broda. Instaliranje takvog sustava najbolji je način povećanja pouzdanosti i raspoloživosti kako porivnog kompleksa, tako i broda kao cjeline. Ovom se problemu nije posvećivala potrebna pozornost zbog nedostatka podataka o kvarovima, tegljenjima i gubicima koji su proizašli uslijed kvara generatora, budući da kompanije s takvim podacima nerado izlaze u javnost. Najveći problem proračuna rizika kvara je nemogućnost predviđanja gdje će se i kada dogoditi, budući da do kvara može doći prvog ili posljednjeg dana plovidbe, na najdužim ili najkraćim relacijama plovidbe, a trenutak pojave kvara u radnom vijeku broda mijenja postojeću vrijednost troškova broda.

Istraživanja na temu modeliranja brodskih pomoćnih sustava s gledišta sigurnosti poriva broda su, bez sumnje vrlo složena, kako teorijski tako i praktično, poglavito stoga što je tehnički sustav energetike broda sam po sebi



vrlo složen organizacijsko - tehnički sustav. U većini slučajeva dinamičke promjene tokova energije i informacija utječu na sigurnost brodske energetike. Energetski i informacijski parametri su složeni, nelinearni, visokoautomatizirani i vrlo skupi. Pritom su osjetljivi na moguća ekstremna pogonska stanja koja pri tome ugrožavaju plovidbu broda, sigurnost posade i putnika, tereta, odnosno egzistenciju sigurnosti broda kao cjeline. Očito je da na ovakvom realitetu nisu mogući eksperimenti "u živo", već je za znanstveno izučavanje važna dinamika ponašanja modeliranog sustava. Potrebno je definirati odgovarajuće sustave modela na kojima se mogu razmatrati dinamika ponašanja promatranog sustava, do određivanja optimalnog energetskog broskog sigurnosnog sustava i sve to uz minimalna materijalna ulaganja i bez opasnosti za realitet.

## 1.2. Cilj istraživanja

Cilj ovoga rada je cjelovito sagledavanje i definiranje modela brodskih pomoćnih sustava s gledišta sigurnosti propulzije broda. Nadalje, cilj je, koristeći metodologiju opće teorije sustava, olakšati razumijevanje kompleksne strukture sustava, stanja i interakcija u njemu. Opća teorija sustava omogućava sagledavanje granice sustava i spoznaju o tome što je moguće poboljšati u njemu. Na temelju znanstvene paradigme o sustavnom pristupu da je cjelina primarna, želi se doći do spoznaje o interakcijama njenih dijelova. Sigurnost broda u eksploataciji velikim se dijelom temelji na sigurnosti porivnog sustava broda. Potrebno je problem općenito postaviti i formulirati, pri čemu će se posebna pažnja posvetiti problemu koji obuhvaća elektroenergetski sustav na brodu, te ovisnost propulzije broda o kvarovima dizelskih generatora.

Razni oblici sklopovske, programske, vremenske i informacijske redundancije pružaju, uz odgovarajuću cijenu, velike praktične mogućnosti povećanja raspoloživosti sustava kao cjeline. Kako postojanje zalihosti u sustavu ne osigurava automatski i veću pouzdanost, potrebno je ugraditi postupke koji obavljaju mogućnost upućivanja neophodnih sustava za normalno startanje i rad porivnog motora u slučaju kvar dizelskih generatora. Ovaj pristup temelji se na istraživanju kvarova dizelskih generatora tijekom eksploatacije broda, kao osnovnog proizvođača električne energije na brodu.

Predloženi model sustava ne treba se temeljiti samo na povećanju zalihosti, već i na unapređenju organizacije sustava, novim algoritmima upravljanja, kako u ispravnom stanju, tako i u stanju djelomične ispravnosti broskog strojnog sustava, s ciljem da se omogući što sigurniji poriv broda.

Pored toga, cilj ovog istraživanja je definiranje modela koji će omogućiti prikaz ponašanja sustava u slučaju nestanka električne energije, odnosno kvara

dizelskog generatora, startanje neophodnog porivnog motora s postepenim opterećenjem, te upućivanje neophodnih pomoćnih sustava za startanje porivnog motora.

Prema rezultatima provedenog istraživanja i analize brodskog sustava, potrebno je dati prijedloge za moguće poboljšanje sigurnosti i raspoloživosti, kako poriva brodskog strojnog kompleksa, tako i broda u cjelini.

### **1.3. Dosadašnja znanstvena istraživanja**

Dosadašnja istraživanja su se pretežno bazirala na tzv. analitičko znanstvenom pristupu, koji daje prednost izučavanju dinamike ponašanja pojedinih sustava i njegovih dijelova. Pri tome su se zanemarivale interkomunikacijske uzročno - posljedične veze, koje realno egzistiraju između sustava za energetiku i propulzije kao cjeline, te njegove relevantne okoline. To je rezultiralo povećanjem zalihosti tamo gdje su istraživanja i iskustvo upućivali na to da pouzdanost pojedinačnih komponenti nije zadovoljavajuća. Isto je tako poznato, da očekivani kvarovi sustava propulzije izazivaju potpunu neupravljivost broda na određeno razdoblje. Tamo gdje se zbog komercijalnih i ekoloških uvjeta gubitak propulzije, čak i na vrlo kratko vrijeme, ne može tolerirati, brodovlasnici su, da bi smanjili rizik, prisiljeni pribjeći još rigoroznijim zahtjevima za zalihošću. Naravno da su takav trend pratila i adekvatna istraživanja.

U zadnje vrijeme uočavaju se opsežna istraživanja brodskog energetskog sustava u poboljšanju i razvoju novih konstrukcija, koja su temeljena na iskustvu, talentu i radu konstruktora i inženjera u praksi i predstavljaju dugotrajan, skup, ali učinkovit put. Zbog toga su se razvile metode proračuna u nastojanju da se analitičkim putem analiziraju utjecajni čimbenici odvijanja radnog procesa i dobiju parametri za izradu novih konstrukcija i sustava.

Da bi se istražila pouzdanost pojedinih sustava propulzije broda, oformljen je u Japanu tzv. "Ship Reability Investigation Committee" (SRIC), koji je izvršio studiju pouzdanosti sustava propulzije na 231 brodu različitih namjena u periodu od 1982. do 1993. godine, i statistički obradio dobivene rezultate. Istraživanja su pokazala, da od svih kvarova koji su utjecali na otkazivanje sustava propulzije broda, kvarovi pomoćnih brodskih uređaja i pomoćnih motora sudjeluju s cca. 50 %, s prosječnim vremenom kvara od cca. 6 sati.

Rezultati i spoznaje proistekle iz vrlo temeljite analize, ukazuju na opravdanost daljnjih istraživanja vezanih za sustave i procese, opreme i postrojenja za proizvodnju i razdiobu električne energije na brodu. Brodogradilišta i brodarska društva najčešće pokušavaju parcijalno riješiti

konkretna aktualna problema vezane za proizvodnju i održavanje sustava u eksploataciji [16], no rezultati istraživanja ukazuju da se razvoj brodskog strojnog kompleksa s gledišta sigurnosti propulzije broda mora istražiti sustavno, te da osim povećanja zalihosti pojedinih podsustava, treba razviti i alternativna rješenja koja će povećati sigurnost broda u cjelini.

S gledišta upravljanja strojnim kompleksom, razvijena je i uvedena u eksploataciju tzv. četvrta generacija automatizacije broda (1995. g.), čija je karakteristika stopostotna integracija brodskih sustava. Kao buduća područja istraživanja ističu se procjena i interpretacija podataka korištenjem dijagnostičkih sustava, inteligentno upravljanje alarmima i predviđanje performansi sustava.

U okviru magistarskog rada "Analiza i izbor rashladnog sustava broda", izvršena su istraživanja jednog od podsustava poriva broda. Rezultati i spoznaje koje su dobivene u tom radu, umnogome će se koristiti u sveobuhvatnom sagledavanju cjeline brodskog strojnog kompleksa i poriva broda, što je i tema ovoga rada.

## **1.4. Metode znanstvenog istraživanja**

U ovome se radu kombinira veći broj aplikativnih istraživačkih metoda u izučavanju pojedinih područja tretirane problematike. Da bi se došlo do relativnih podataka koji su korišteni, uz pomoć metode klasifikacije, opće poznavanje problema podijeljeno je na posebne dijelove koje taj pojam obuhvaća. Nadalje se u radu analizira svako pojedino područje, svaki pojedini dio problematike pažljivo je i točno opisan, odnosno koristi se deskriptivna metoda. Nakon ove faze istraživanja prelazi se na sintezu pojedinih područja i pri tome se koristi induktivna metoda zaključivanja od posebnog ka općem.

Kako je nužno istražiti strukturu i ponašanje, odnosno funkcioniranje brodskih pomoćnih sustava, osobito podsustava propulzije broda, primjenom komparativne metode uopćilo se modeliranje brodskih pomoćnih sustava s gledišta sigurnosti poriva broda.

Prilikom definiranja sustava primijenjena su načela znanstvene metode opće teorije sustava u kombinaciji s drugim znanstvenim metodama za određivanje strukture sustava (elementi i interaktivne sprege između pojedinih podsustava i elemenata), njegovih aktivnosti, stanja, te njegovih izlaznih parametara.

Za analizu statističkih podataka korištene su statističke metode. Značajne dodatne informacije prikupljene su metodom intervjua s obzirom na interdisciplinarnost tretirane problematike.

## 1.5. Kompozicija rada

Polazeći od postavljenog problema, zadanih ciljeva i ocjene dosadašnjih istraživanja, te rabeći određene znanstvenoistraživačke metode, tematika ove doktorske disertacije sistematizirana je u sedam međusobno povezanih dijelova. Polazeći od postavljenog problema, istraživanje je izvršeno sustavnim znanstvenim pristupom, koje se bazira na holističkom pristupu, što znači da se promatra kao cjelina sastavljena od dijelova interkomunikacijskih, međusobno povezanih uzročno - posljedičnih funkcionalnih veza, odnosno kao cjelina koja djeluje na informacijske tokove.

U prvom, uvodnom poglavlju postavljena je metodologija istraživanja kroz normativne forme prikaza problema i cilja, ocjena dosadašnjih dostignuća i pregled apliciranih znanstveno - istraživačkih metoda.

Drugo poglavlje obrađuje identifikaciju procesa porivnog motora s gledišta otpora, propulzije, te veličine i brzine broda. Prikazuje definiciju odabira porivnog stroja s gledišta eksploatacije broda kao cjeline. Opisani su novi propisi klasifikacijskih društava, koji se odnose na zalihost porivnog uređaja broda, a služe kao preporuka brodarima. Daju se karakteristike brodskih elektroenergetskih sustava, koje ga razlikuju od kopnenih sustava, a one proizlaze iz uvjeta okoline, propisa klasifikacijskih ustanova, autonomnosti i veličini električnih sustava, utjecajnih faktora i tehničko - tehnoloških karakteristika. Pored toga, prikazana je slojevitost zadataka vođenja elektroenergetskih procesa na brodu i interakcija procesnih uređaja, procesnog kontrolora i nadređenog sustava vođenja.

U trećem poglavlju definira se istraživačko razvojna koncepcija inteligentne strojarne, a koja nastoji biti odgovor na zahtjeve što veće automatizacije i pouzdanosti pogona. Posebna pozornost je dana inteligentnom motoru, koji je još u razvoju s primjenama privješених pumpi goriva i maziva, te elektroničkog sustava za ubrizgavanje goriva i pokretanje ispušnih ventila. Motor je automatiziran, a sustavom elektronike prati se i provjerava stanje motora, podešavaju veličine parametara za poboljšanja performansi motora, te dijagnosticira veliki opseg kvarova.

Istraživanja su koncentrirana na slučajeve kvara dizelskog generatora (nestanka struje za pogon sustava poriva) i mogućnost upućivanja porivnog stroja s gledišta koncepta inteligentnog motora. Da bi se došlo do zadanog cilja, potrebno je analizirati najnovija dostignuća porivnih motora i mogućnost njihovog upućivanja u rad. Iz poglavlja je vidljivo da su novi tipovi dvotaktnih dizelskih motora za poriv broda opremljeni privješеним pumpama goriva i maziva, te je potrebno razmotriti mogućnost startanja motora na osnovi postojećih privješених sustava. U poglavlju je sa velikom pozornošću analiziran model privješених pumpi ulja i mogućnost korištenja visokog tlaka ulja za ugradnju hidrogeneratora,

koji bi proizveo snagu za pokretanje neophodnih pomoćnih sustava porivnog motora. Istraživanja privješeni uređaja na porivnom motoru su vrlo složena, kako teorijski tako i praktično, a definirani model sustava bio bi parcijalan. Rezultati ukazuju na to, da se akumulativna energija hidraulike povećava i vremenski je ograničena, što iziskuje povećanje kapaciteta i broja akumulatora na brodu. U sustavu hidraulike, pumpe hidraulike pri startanju motora pokreću elektromotori, što ukazuje na potrebitost električne energije pri startanju motora. Predviđeni hidrogenerator morao bi biti veći za snagu pumpi hidrauličnog sustava, pa bi ovakvo rješenje podsustava hidraulike bilo ne ekonomično, što zbog akumulatora, tako i zbog relativno niskog stupnja iskoristivosti hidraulike. Model ima nedostatke i zbog mogućnosti propuštanja, što bi izazvalo pad tlaka, koji bi negativno utjecao na ugrađene hidrogeneratore, a povećalo bi se i održavanje cjelokupnog hidrauličnog sustava. Kod definiranja modela najveći problem predstavlja dinamička promjena hidrauličnog toka, izazvana pogonom hidrauličnog generatora i padom tlaka u hidrauličnim akumulatorima, što dovodi do problema vremenskog ograničenja dobivanja električne energije. Analizirana je mogućnost definiranja vremena rada hidrogeneratora do startanja porivnog motora, pri čemu se nailazi na niz problema koje je vrlo teško definirati, pa bi bilo idealno zanemariti vremensku komponentu rada hidrogeneratora, što praktički nije moguće u ozbiljnom istraživanju, stoga se odustalo od definiranja modela ugradnje hidrogeneratora s privješnim pumpama na porivni motor.

U četvrtom poglavlju detaljnije je istražen model sigurnosti pogona i pouzdanosti porivnog motora s gledišta opskrbe električnom energijom. Sustav je determiniran kao cjelina sastavljena od dijelova u interakcijskom djelovanju međusobno i s okolinom. Za normalan rad propulzije prikazani su neophodni pomoćni sustavi s njihovim parametrima i specifičnim karakteristikama. Analizirane su protočne veličine i konstruirani dijagrami protoka u skladu s preporukama glavnih proizvođača dizelskih motora. Definirani su podsustavi poriva broda (podsustav morske vode, slatke vode, sustav ulja, goriva i sustav uputnog zraka) i konstruirani dijagrami potrebne snage i količine protoka. Prikazane su međufunkcijske uzročno - posljedične veze između brodskog porivnog sustava i neophodnih brodskih sustava tijekom eksploatacije broda. Da bi se prikazao utjecaj pojedinih čimbenika neophodnih sustava na djelovanje porivnog motora, a za identifikaciju kvarova komponenti dizelskog procesa, obavljena je simulacija kvarova svih bitnih komponenti podsustava s različitim scenarijima na strojarskom simulatoru. Snimljeni su odzivi relevantnih varijabli sustava, analizirani i uočeni simptomi, međudogađaji i kvarovi, te odnosi među njima. Analizom dobivenih podataka, potvrđeno je da kvarovi na bilo kojem navedenom sustavu uzrokuju promjene tlaka i temperatura na porivnom motoru, što u određenom vremenu djeluje na zaustavljanje poriva broda. Time je simulacijom napravljen formalni opis problema koji predstavlja temelj za sintezu rješavanja problema kvar dizelskog generatora i nestanka električne energije za pokretanje porivnih sustava.

Prikazani dijagrami snage i protoka pojedinih sustava predstavljaju temelj daljeg istraživanja i postavljanja novog modela brodskih pomoćnih sustava s gledišta sigurnosti poriva broda, kod definiranja novopredloženog dodatnog motora. Koristeći metodologiju opće teorije sustava definiran je novi model, a predloženi koncept omogućit će novi pristup sagledavanja brodskog porivnog sustava, kao samostalnog sustava integriranog u cjelokupni sustav broda.

U petom poglavlju prikazana je pouzdanost i raspoloživost poriva broda, na temelju strukturne analize, koje se mogu koristiti u slučaju kvara. Procjena sustava je u potpunosti dio procesa projektiranja. Raspoloživost u eksploataciji broda je vrlo bitan faktor, dok pouzdanost sustava predstavlja njegovu sposobnost za neprekidno obavljanje njegove funkcije tijekom promatranog vremena pod određenim uvjetima. Analizirani su modeli pouzdanosti, a posebno utjecaj pokrivanja grešaka od strane dijagnostike, na pouzdanost, raspoloživost i sigurnost sustava. Obrađen je pojam redundantnosti sustava s oznakom uključivanja dodatnih elemenata ili podsustava s namjerom povećanja pouzdanosti sustava.

Da bi istraživanje počivalo na praktičnim pokazateljima i podacima, analizirane su dostupne relevantne baze podataka o kvarovima koji su nastali tijekom eksploatacije velikog broja brodova, a iste su objavljene na relevantnim skupovima ili uglednim časopisima. Iz prikazanih studija moglo se zaključiti da su najvjerodostojniji prikazi klasifikacijskih društava (registara brodova), osiguravajućih društava, proizvođača brodskih motora, te državnih ustanova koje vode brigu o sigurnosti plovidbe i pomorstva. Iz analize navedenih studija može se neupitno potvrditi početna teza da značajan broj kritičnih kvarova poriva broda uzrokuju dizelski generatori.

U šestom poglavlju analizirani su modeli utjecaja električne energije na pouzdanost i sigurnost poriva broda. U prethodnim poglavljima ustanovljeno je da su proizvođači električne energije na brodu većinom dizelski generatori. Sustav automatskog upravljanja dizelskih generatora sastoji se od velikog broja upravljačkih parametara koji su međusobno ovisni, a iste je potrebno procesuirati u realnom vremenu zbog pravovremenog odziva sustava. Navedene su osnovne značajke i trendovi njihova razvoja glede konstrukcijskih unapređenja i uvećanja mogućnosti dijagnostike i upravljanja. Temeljem rezultata i obavljene analize, detaljno je istražen model optimalnog izvora električne energije s gledišta fleksibilnosti, pouzdanosti i efikasnosti u otežanim pogonskim uvjetima. Analiziran je strukturni model brodskog dizelgeneratorskog procesa i prikazani odnosi među ključnim varijablama, kao i prisutna ograničenja.

Posebno su obrađeni principi alternativnog dobivanja električne energije pomoću osovinskog generatora i turbogeneratora, koji se po propisima registara vode kao pomoćni sustavi i nisu obvezatni. Utjecaj osovinskog generatora i turbogeneratora na sigurnost porivnog motora simuliran je na strojarskom simulatoru, a na osnovi rezultata simulacije utvrđene su vremenske promjene i uzročnici ispada iz pogona. Napravljen je formalni opis problema, koji predstavlja

temelj za sintezu rješenja ponovnog pokretanja pomoćnih sustava neophodnih za upućivanje porivnog sustava u slučaju kvara dizelskog generatora.

U sedmom poglavlju analiziran je kvara sustava za dobivanje električne energije, gdje dolazi do ugrožavanja sigurnosti plovidbe, odnosno poriva broda. Analizirani su dizelgeneratorski procesi s gledišta ispravnosti rada porivnog motora, te se dolazi do čvrstih argumenata o većinskoj ovisnosti poriva broda o proizvodnji električne energije. U radu su prikazani sigurnosni modeli poriva, iz kojih je jasno vidljiva navedena ovisnost, pa se može ustanoviti da kod kvara sustava poriva broda, dominantnu ulogu imaju dizelski generatori. Analiza je dokazala da u strojnom kompleksu permanentno rade dizelski generatori, te imaju najveći postotak kvarova (havarija).

Iz konkretnog primjera istraživanja rizika i troškova na suvremenom tankeru, dokazana je ovisnost vremenskog faktora na učinkovitu eksploataciju broda, što proizlazi iz samorazumljive činjenice da duže vrijeme stajanja ili tegljenja broda proizvodi veće gubitke.

U poglavlju je predložen novi model dobivanja električne energije za normalan pogon pomoćnih sustava porivnog motora, u slučaju kvara dizelskog generatora. Definirana je struktura novog sustava, određena su stanja i mogućnosti uporabe predloženog sustava, te postavljeni algoritmi za stanja startanja pomoćnih sustava, pripreme porivnog motora i startanje istog, opterećenje porivnog motora i upućivanje osovinskog generatora.

Na osnovi rezultata istraživanja potvrđeno je da je za porivni dvotaktni sporookretni dizelski brodski motor, a u cilju povećanja pouzdanosti, raspoloživosti i učinkovitosti porivnog procesa, nužno ići s promjenom koncepcije konvencionalnog sustava pogona s tolerancijom kvarova. Autor smatra da je ovim istraživanjem dao znanstveni doprinos i smjernice, kako budućim projektantima brodskog strojnog kompleksa, tako i znanstvenicima koji sustavno istražuju problem povećanja sigurnosti broda, koja se očituje u mnogim međusobno povezanim i ovisnim čimbenicima, od kojih je sustav poriva broda svakako jedan od najznačajnijih.

U zaključku je prikazana sinteza cjelokupnog rada (s teorijskog i aplikativnog gledišta), odnosno prezentirani su rezultati istraživanja, kojima se rješava postavljeni problem i dokazuju postavljene hipoteze.

Istraživanja i rezultati ove disertacije proizašli su iz znanstvenog projekta "Energetski sustavi broda, alternativna goriva i smanjenje emisija štetnih tvari" (br. 112-1121722-1712), voditelja prof. dr. sc. Enca Tirelija, provedenog uz potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske.

## **2. ENERGETSKE POTREBE BRODA**

### **2.1. Uvod**

Nagli razvoj automatizacije te porast nosivosti i brzine broda dovodi do sve većih energetske potrebe za održavanje željenog tehnološkog stanja na brodu. Energetske potrebe ovise o vrsti i namjeni broda, a predstavljaju energiju poriva broda i energiju za potrebe broda i brodskih sustava.

Pod porivnim kompleksom podrazumijeva se energija porivnog stroja s uređajima koje opslužuje, te se dijeli na strojeve za poriv broda, osovinski vod (sustav prijenosa energije za poriv broda) i brodski vijak (propulzor) koji koristi energiju za poriv broda. Iskoristivost mehaničke energije porivnog stroja ovisi o toplinskom stupnju djelovanja, a kako dizelski motor ima najveći stupanj djelovanja, dizelmotorni pogon u većini slučajeva predstavlja rješenje za brodsku propulziju.

Pri eksploataciji modernih plovni objekata (trgovačkih brodova, putničkih brodova, brodova specijalne namjene itd.) od iznimne je važnosti visok stupanj efikasnosti i raspoloživosti pogonskih procesa, u okviru kojih su u velikoj većini izvedbi osobito značajni elektroenergetski procesi.

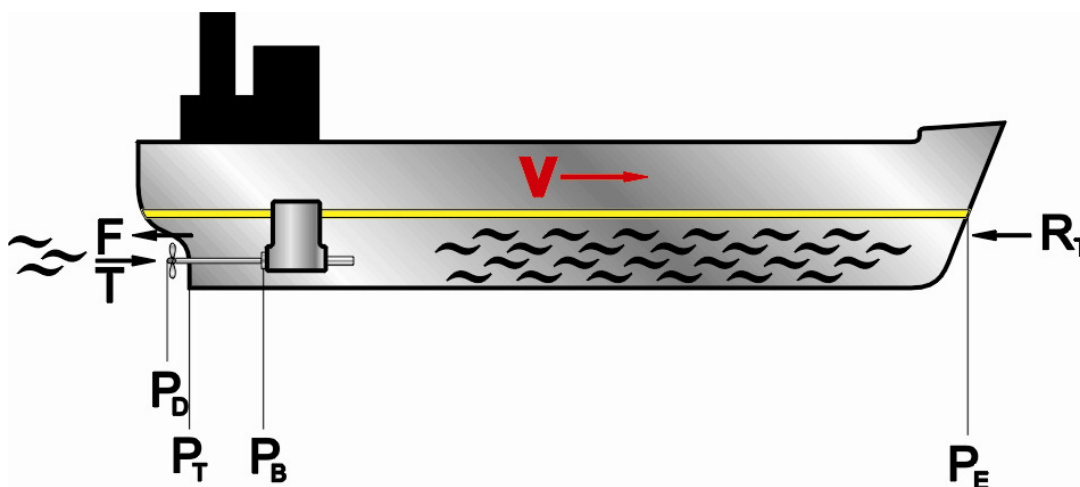
Procesi na brodu su povezani s pogonskim uvjetima, sve u cilju održavanja normalnog pogona broda, osobito u otežanim uvjetima rada, kao što je nevrijeme na moru, manevar broda, itd.

Vrlo važna, svakako najzahtjevnija je električna energija na brodu, koja služi za napajanje i pogon električnih uređaja, koji su neophodni za odvijanje tehnoloških procesa (ukrcaj, iskrcaj, manevriranje, plovidba itd.) i za stvaranje uvjeta za rad i boravak osoblja na brodu. Mogući kvar, odnosno otkazivanje pomoćnih motora dovodi do ugrožavanja sigurnosti broda. Posljedica takvog stanja je nestanak poriva broda, generator za nuždu je u radu, a brod pluta prepušten vanjskim uvjetima na koje posada ne može utjecati. Čeka se osposobljavanje pomoćnih motora koje može potrajati nepredviđeno dugo. Često se brod mora tegliti do prve luke. Da bi se pokrenuo glavni motor i izbjeglo tegljenje broda, u ovome se radu želi definirati model sustava, koji će omogućiti rad svih neophodnih sustava za ponovo upućivanje glavnog motora, kako bi se nesmetano nastavilo s plovidbom. Prekid primarnog napajanja električnom energijom, time više ne bi predstavljao prekid tehnološkog procesa na brodu.



### 2.1.1. Otpor i propulzija

Otpor je sila koja se suprotstavlja kretanju broda. Za ostvarenje gibanja broda potrebno je degenerirati porivnu silu  $T$  (slika 1.), koja će savladati otpore poriva broda  $R_T$ . Jedan od najvažnijih zadataka pri projektiranju broda je određivanje njegovog otpora. Otpor se određuje da bi se utvrdila optimalna linija trupa broda, te da bi se mogla odabrati potrebna snaga brodskog pogonskog uređaja.



Slika 1. Sile poriva broda

Brojni su izvori otpora propulzije, a najčešće su sistematizirani [38] u tri skupine:  $R_F$  - otpori trenja,  $R_R$  – rezidualni otpori i  $R_A$  – otpor zraka.

Otpori trenja i rezidualni otpori (valovi, tlak, tzv. "privjesci") ovise prvenstveno o površini broda (trupa) ispod vodene linije, dok otpori zraka ovise o površinama iznad vodene linije, pa se tako i njihov udio u ukupnom otporu mijenja prema tipu i veličini broda.

Otpor broda ovisi o nizu čimbenika kao što su veličina i oblik brodskog trupa, veličina i stanje mokrih površina (obrustanje, korozija, kavitacija), veličini i rasporedu tereta, gustoći i dubini mora, gasu, vrsti plovidbe (pramcem, krmom, manovra), stanju mora i dr.

Ukupna sila otpora propulziji broda može se prikazati izrazom:

$$R_T = R_F + R_R + R_A = R_F + R_W + R_E + R_A .$$

Gdje je:  $R_W$  - sila otpora valova,  $R_E$  - sila vrtloženja iza trupa, koja uglavnom ovisi o otporu tlakova i privjesaka.

Utjecaj navedenih sila na ukupnu silu otpora je različit i ovisi o veličini i brzini broda.

Snaga potrebna za svladavanje otpora propulzije broda  $R_T$  može se izraziti funkcijom brzine broda:

$$P_E = R_T \cdot v \quad \text{gdje je } v - \text{brzina broda u odnosu na mirno more (m/s)}$$

Sila poriva  $T$ , kojom brodski vijak omogućava gibanje broda brzinom  $v$ , odnosno svladava silu otpora propulzije broda  $R_T$  (Slika 2.1), mora biti uvećana za gubitke propulzije (sila  $F$ ).

$$T = R_T + F$$

Snaga koju brodski vijak treba predati mediju je :

$$P_T = P_E / \eta_H \quad \eta_H - \text{stupanj iskoristivosti broskog trupa.}$$

Snaga koju je potrebno predati broskom vijku je :

$$P_D = P_T / \eta_B \quad \eta_B - \text{stupanj iskoristivosti broskog vijka.}$$

Snaga koju treba osigurati brodski porivni stroj je :

$$P_B = P_D / \eta_S \quad \eta_S - \text{stupanj iskoristivosti prijenosne osovine,}$$

Ukupan stupanj iskoristivosti brodske propulzije je:

$$\eta_{SP} = P_E / P_B = \eta_H \eta_B \eta_S .$$

### 2.1.2. Brodski vijak

Brodski vijak omogućava brodu kretanje u smjeru pramca ili krme, isplovljavanje ili pristajanje te nadzor broda u svim uvjetima pokretanja broda. Postoji veliki broj različitih propulzora, odnosno sustava za pokretanje broda, međutim danas se najčešće upotrebljava vijčani propeler. Kod vijčane propulzije postoje dva osnovna sustava, a to su vijak s fiksnim krilima FPP<sup>1</sup> koji ima fiksni hod i vijak sa zakretnim krilima CPP<sup>2</sup> s promjenljivim hodom. Vijak s fiksnim krilima se još uvijek najviše upotrebljava zbog jednostavnosti izvedbe i većeg stupnja iskoristivosti. Kod brodova s promjenljivim režimima djelovanja porivnog motora, bolji je vijak s promjenljivim hodom, budući da u toj kombinaciji glavnih porivnih komponenti dobivamo optimalnu fleksibilnost u eksploataciji a time i najveći stupanj iskoristivosti, ali je nažalost i izvedba najskuplja. Stoga se kombiniraju izvedbe poriva s konstantnom brzinom vrtnje motora i varijabilnim hodom krila broskog vijka.

Praksa i istraživanja su pokazala da na učinkovitost broskog vijka utječu što veći promjer i broj krila vijka te što manja brzina vrtnje, površina krila, hrapavost površine i nagib osovine vijka. Osnovne dinamičke značajke broskog

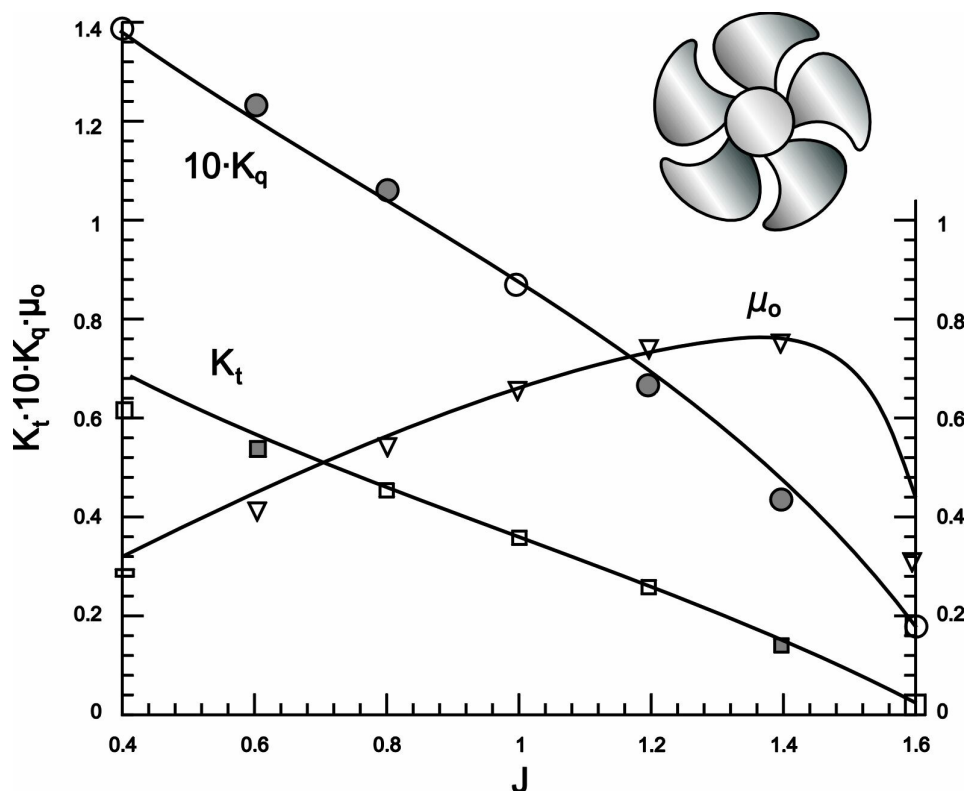
---

<sup>1</sup> FPP – Fixed Pitch Propeller

<sup>2</sup> CPP – Controllable Pitch Propeller

vijka [38] su porivna sila  $T$ , moment  $M$ , brzina vrtnje  $n$ , brzina napredovanja vijka  $v$ , korak ili uspon broskog vijka  $h$ , slip vijka  $s$  i stupanj iskoristivosti  $\eta_0$ .

Općenitosti radi, navedene se karakteristike najčešće izražavaju bezdimenzionalnim značajkama, odnosno relativnim napredovanjem broskog vijka  $J$ , poriva  $K_t$  i momenta  $K_M$  (slika 2.).



Slika 2. Krivulja djelovanja broskog vijka u slobodnoj vodi

$$T = K_t \cdot \rho \cdot n^2 d^4$$

$$J = \frac{v}{n \cdot d}$$

$$K_M = \frac{M_p}{\rho \cdot n^2 \cdot d^5}$$

$$M_p = \frac{P_D}{2\pi \cdot n}$$

$$\eta_0 = \frac{P_T}{P_D} = \frac{T \cdot v}{M_p \cdot 2\pi \cdot n} = \frac{K_t \cdot J}{K_M \cdot 2\pi}$$

Pri čemu je:

$d$  - promjer brodskog vijka [m]

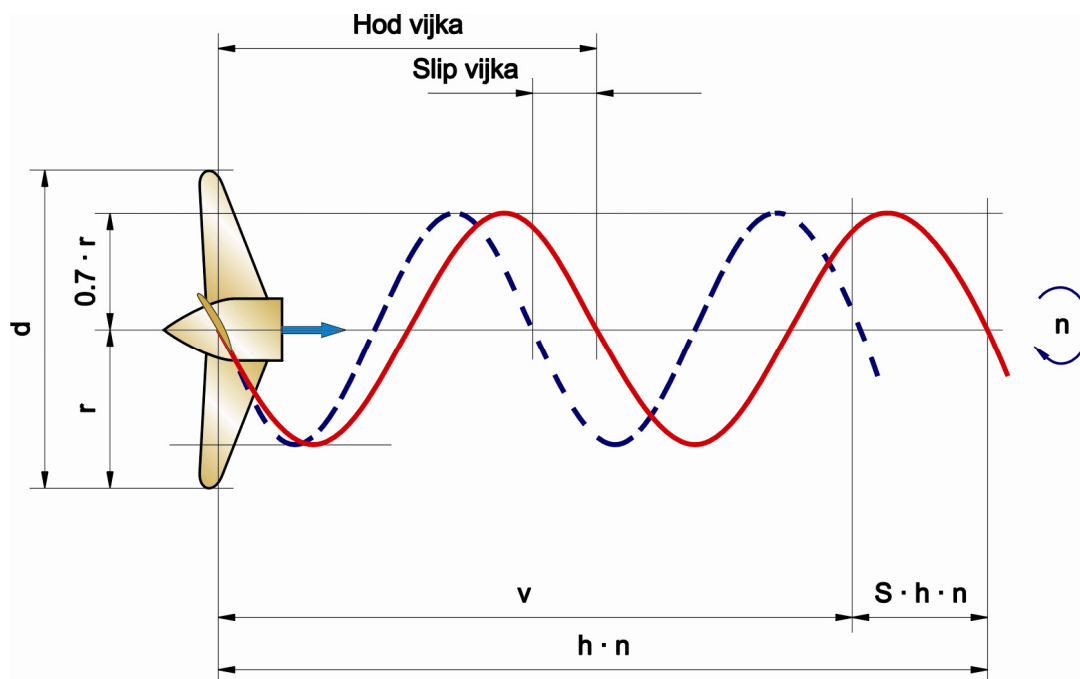
$n$  - brzina vrtnje brodskog vijka [ $s^{-1}$ ]

$\rho$  - specifična gustoća mora [ $kg/m^3$ ].

Učinkovitost brodskog vijka, kao prijenosnika energije determinira se njegovim stupnjem iskoristivosti, koji je jednak omjeru iskorištene i uporabljene snage. Međutim, kako se vidi iz prikazanog izraza, stupanj iskoristivosti ovisi o koeficijentima poriva i momenta te koeficijenta relativnog napredovanja brodskog vijka. Uz pomoć posebnih, vrlo složenih dijagrama brodskog vijka [81], koji sadrže navedene bezdimenzionalne značajke, moguće je odrediti dimenzije, porivnu silu i snagu te stupanj učinkovitosti brodskog vijka.

Kad brod plovi pramcem s njim se gibaju i čestice vode izazivajući tzv. "sustrujavanje", zbog kojeg dolazi do smanjenja brzine pritjecanja vode na disk vijka, pri čemu je polje brzina pritjecanja nejednoliko. Brzina pritjecanja vode brodom vijku  $v$ , formira tzv. stvarni slip (skliz)  $s_t$ , za razliku od prividnog slipa  $s_p$ , koji je odnos između izmjerene brzine broda  $v_a$  i teorijske brzine dobivene iz uspona vijka  $h$  i brzina vrtnje  $n$  (slika 3. )

$$S_t = \frac{h \cdot n - v}{h \cdot n} = 1 - \frac{v}{h \cdot n}, \quad S_p = \frac{h \cdot n - v_a}{h \cdot n} = 1 - \frac{v_a}{h \cdot n}.$$



Slika 3. Osnovne dinamičke značajke brodskog vijka

Vijak s nepomičnim krilima proračunava se za najveću ekonomičnost pri nominalnoj snazi motora i nominalnoj brzini vrtnje, dok se pri drugim režimima ne može iskorištavati maksimalna trajna snaga motora, što utječe na brzinu vrtnje i stupanj iskoristivosti samoga poriva.

Kod uporabe vijka s prekretnim krilima, odnosno vijka s promjenljivim usponom, u slučaju povećanja otpora uspon se može smanjiti i time održati nominalna brzina vrtnje i iskorištavati punu snagu motora, a da se motor ne preoptereti.

### **2.1.3. Određivanje snage poriva**

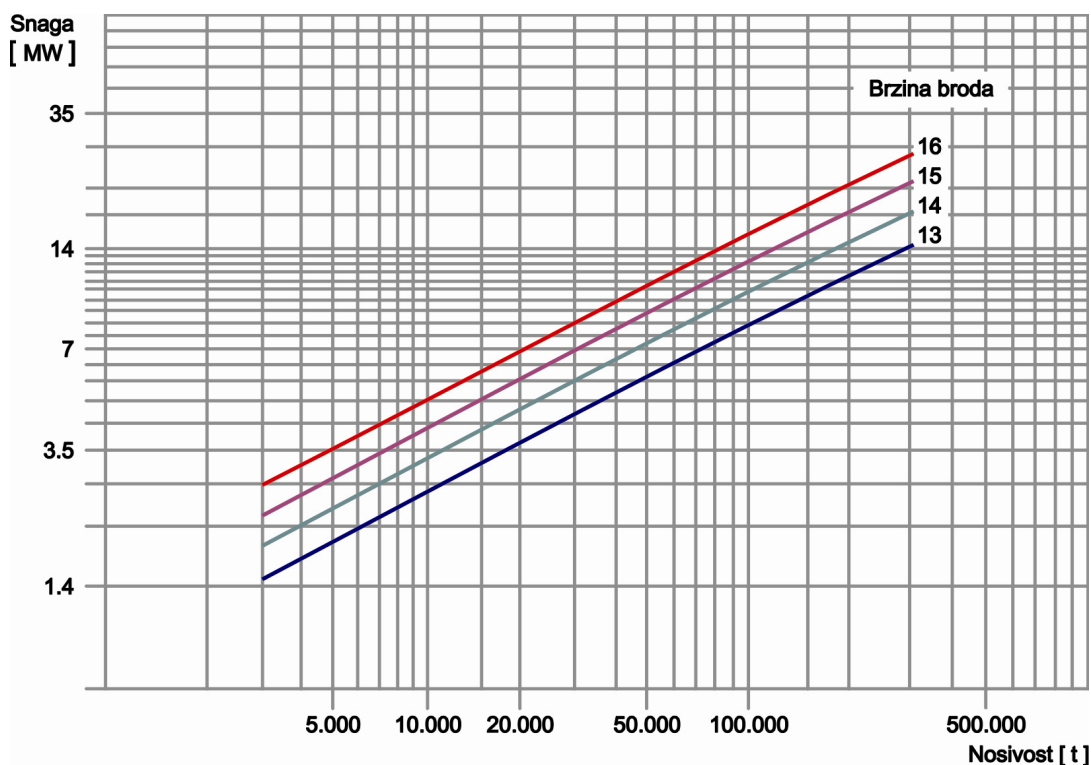
Zahtijevana brzina broda u eksploataciji definira potrebnu snagu poriva. U većini slučajeva projektirana brzina se poveća za 4 do 5% od definirane brzine broda, tako da smo pri probnoj vožnji broda sigurni u odabranu veličinu.

Izlazna snaga dizelskog motora mijenja se linearno s promjenom brzine, odnosno dvostruko povećanje brzine rezultira dvostrukim povećanjem izlazne snage motora. Snaga koja je potrebna za pogon brodskog vijka također se mijenja s povećanjem brzine i to približno s trećom potencijom brzine. Kako se za vrijeme plovidbe broda uvjeti mijenjaju, to utječe na promjenu opterećenja motora. Snaga predana brodskom vijku jednaka je efektivnoj snazi umanjenoj za gubitke trenja i prijenosa između brodskog vijka i spojke koljenastog vratila. Snaga za pogon broda određuje se iz dijagrama izbora snage poriva (slika 4.).

Kada se iz dijagrama odredi pogonska snaga poriva broda, prelazi se na određivanje optimalne brzine vrtnje brodskog vijka (slika 5.). Zato se koriste dijagrami prosječnih promjera brodskih vijaka u zavisnosti od nosivosti broda, odnosno gaza broda, (mjerodavan za određivanje maksimalnog promjera brodskog vijka), a koji se izrađuju na bazi statističkih podataka i proračuna već izgrađenih brodova i daju ih proizvođači, npr. Sulzer "Prect Guide", 1992. g. i MAN B&W "Engine Selection Guide", 1995.

Za definiranje pogonske snage poriva služe različiti iskustveni dijagrami, međutim konačni parametri mogu se dobiti isključivo nakon ispitivanja modela broda u ispitnom bazenu. Svi odabrani parametri testiraju se tijekom probne vožnje broda.

Pri definiranju brodskog vijka, te određivanju potrebne snage porivnog motora, uzima se kao temelj puni ili normalni deplasman broda. Tijekom eksploatacije broda dolazi do promjene njegovog stvarnog deplasmana od praznog do potpuno opterećenog, 100% ukrcanog broda.

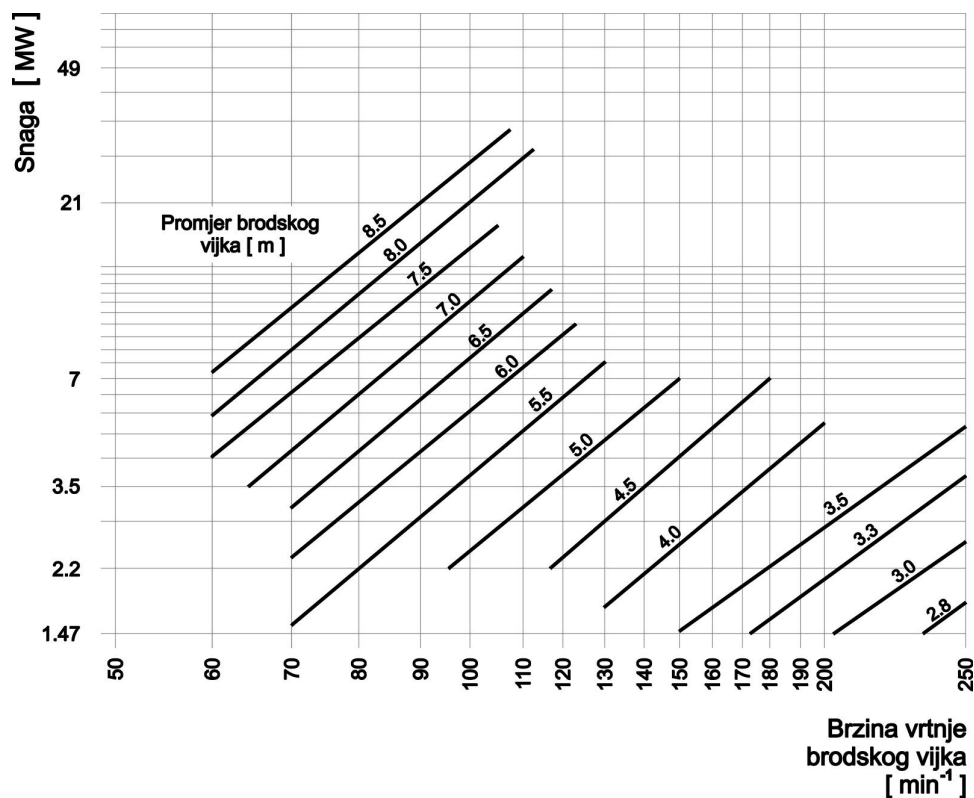


Slika 4. Dijagram izbora snage poriva

Na osnovi lake vodene linije i promjera brodskog vijka, utvrdi se koliko je brodski vijak uronjen u more, da pri plovidbi ne bi uzrokovao usisavanje zraka, te da ne bi izlazio izvan površine trima pri plovidbi broda po valovima.

Nakon definiranja optimalne snage i brzine vrtnje pogonskog stroja, može se preći na odabir porivnog stroja, te se od adekvatnog proizvođača motora odabere odgovarajući motor, koji zadovoljava postavljene uvjete, odnosno tip, veličinu i opseg brzine vrtnje. Na određenu snagu poriva, dodaje se 10% zbog obrastanja brodskog trupa tijekom eksploatacije i rasta otpora broda pri lošim vremenskim prilikama koje uzrokuju nemirno more, tzv. "Sea Margin" ( $SM$ ).

Ukoliko porivni stroj ima osovinski generator (OG), mora se voditi računa o snazi potrebnoj za pogon toga generatora, te se snazi potrebnoj za poriv broda  $P_B$  uz  $SM$  dodaje i OG.



Slika 5. Odnos snaga – promjer – brzina vrtnje

U većini slučajeva brodovlasnik zahtijeva definiranje veličine “engine margin” (EM), koja označava rad porivnog stroja s 80 do 90% opterećenja, budući da se pri eksploataciji porivnog stroja u granicama EM smanjuje potrošnja goriva. Stoga porivni stroj najčešće radi pri navedenog snazi, koja se obično naziva “trajna snaga u službi” (Service Continuous Rating – SCR) s oznakom  $P_{BCT}$ .

Preopterećenja porivnog stroja, koje iznosi 110% snage, može se održavati samo ograničeno vrijeme, odnosno 1 sat na svakih 12 sati rada.

## 2.2. Tehnički odabir pogonskog stroja

Danas se u modernoj brodogradnji grade različiti tipovi brodova, različitih namjena, oblika i dimenzija, što presudno utječe na brodski strojni kompleks i određivanje optimalnog porivnog stroja. Stoga je potrebno sistematizirati pojedine tipove i veličine brodova. Najčešće se civilni trgovački brodovi dijele u sljedeće skupine<sup>3</sup>:

### A. Putnički brodovi:

- linijski putnički brodovi
- putnički brodovi za kružna putovanja (Cruiser)
- Ro – Ro putnički brodovi

### B. Teretni brodovi:

1. Brodovi za prijevoz tekućih (rasutih) tereta<sup>4</sup>
  - tankeri za prijevoz nafte i naftnih derivata (VLCC, ULCC),
  - tankeri za prijevoz kemikalija (CC),
  - tankeri za prijevoz ukapljenih plinova (LNG, LPG),
  - tankeri za prijevoz nafte i rude (OBO)
2. Brodovi za prijevoz rasutih tereta
3. Brodovi za prijevoz općeg (generalnog) tereta:
  - klasični brodovi za prijevoz generalnog tereta
  - specijalni brodovi za prijevoz tereta (Coaster)
    - kontejnerski brodovi
    - Ro – Ro brodovi
    - brodovi za prijevoz teglenica
4. Brodovi za prijevoz hlađenog i smrznutog tereta (hladnjače)
5. Brodovi za teške i vangabaritne terete.

Kod navedenih tipova brodova glavne dimenzije kao što su dužina, širina, visina, nosivost, gaz, itd. međusobno su ovisne i mogu se na osnovi izgrađenih

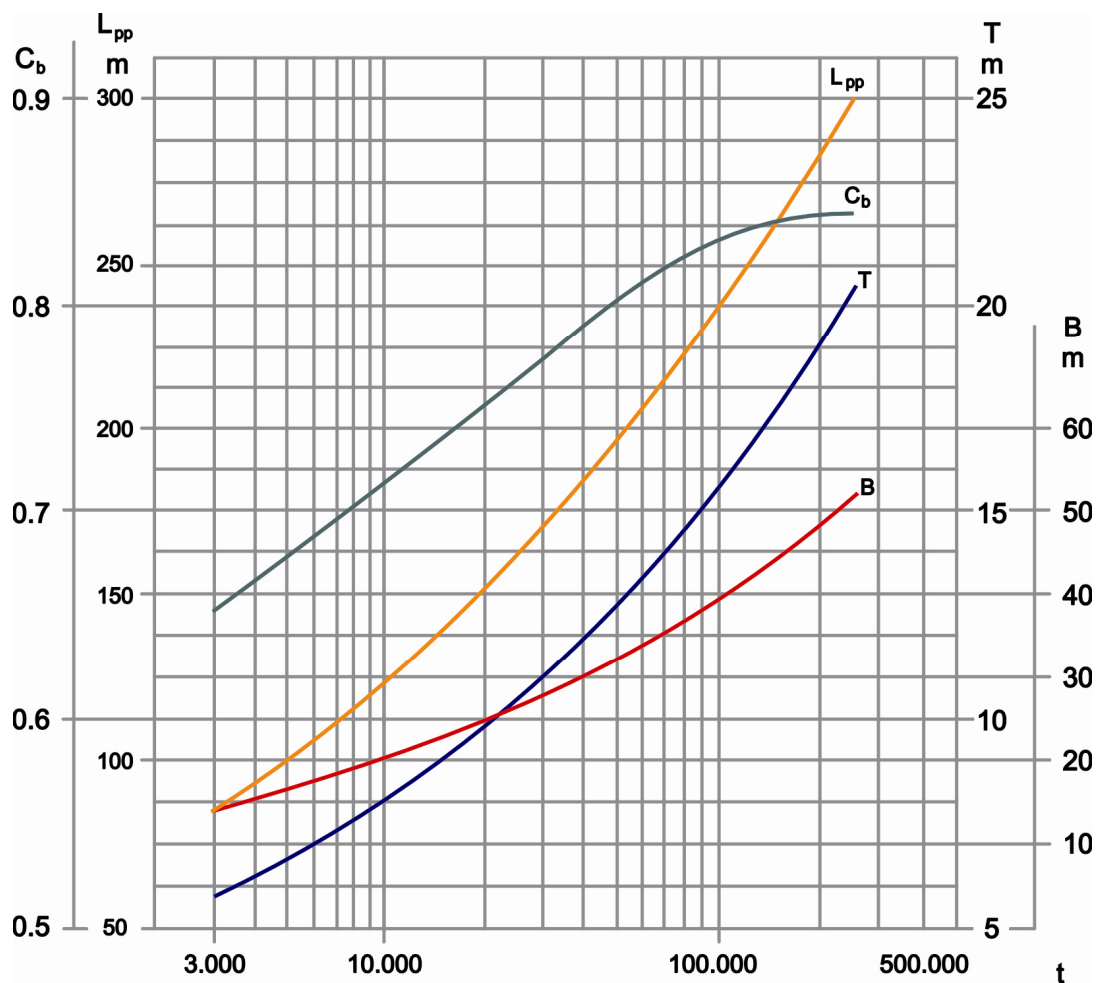
---

<sup>3</sup> *Basic Principles of Ship Propulsion, MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen 1998.*

<sup>4</sup> *VLCC – Very Large Crude Carrier, ULCC – Ultra Large Crude Carrier, LNG – Liquefied Natural Gas, LPG – Liquefied Petroleum Gas, CC – Chemical Carrier, OBO – Oil/Bulk/Ore, Guide, 1992.*



brodova koji su u eksploataciji prikazati dijagramski (slike 6. i 7.), što olakšava proračun i određivanje otpora i propulzije broda.



Slika 6. Glavne dimenzije brodova za prijevoz generalnog tereta, rasutih tereta i tankera<sup>5</sup>

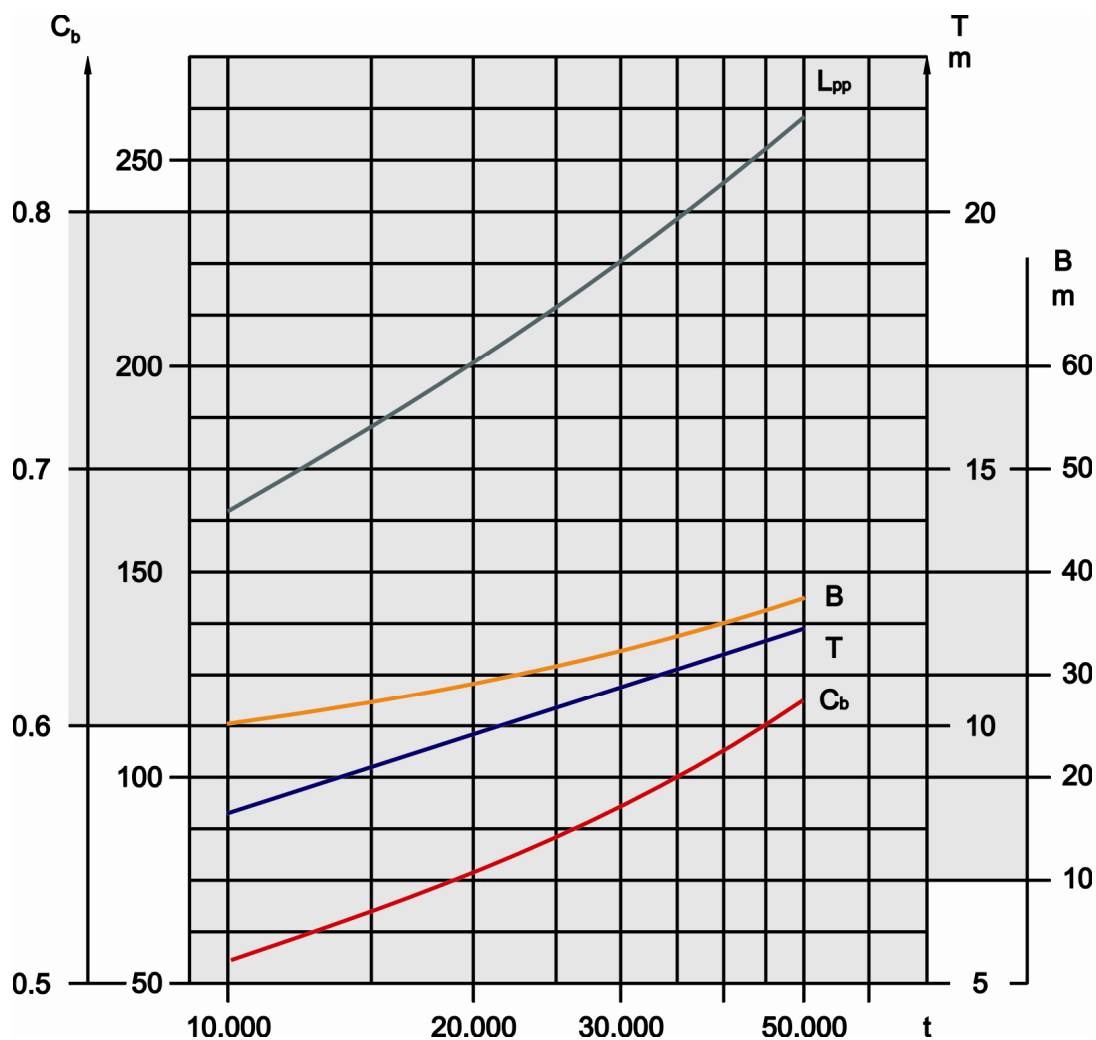
$L_{pp}$  – dužina između osi broda [m]

$B$  – širina broda [m]

$T$  – gaz broda [m]

$C_b$  – koeficijent punoće.

<sup>5</sup> SULZER – Projekt Guide, 1992. g. i MAN B&W Engine Selection Guide 1995.



Slika 7. Glavne dimenzije brodova za prijevoz kontejnera

Odabrani porivni stroj mora zadovoljiti uvjete pri različitim režimima rada, opterećenjima, brzinama vrtnje stroja i pod punim opterećenjem osovinskog generatora. Provjera odabranog porivnog stroja izvodi se prema "MAN B&W" Projekt Guide Two-Stroke Engines uz pomoć tzv. "Layout" i "Load" dijagrama. Prednost "Layout" dijagrama (slika 8.) je ta što uvažava cijeli niz čimbenika koji utječu na motor tijekom cijelog radnog vijeka. Faktori koje treba uzeti u obzir kod analize dijagrama su:

- fleksibilnost sustava,
- potrošnja goriva,
- mogućnost uporabe osovinskog generatora,
- efikasnost poriva.

Dijagram pokriva područje unutar kojega je moguća potpuna sloboda odabira kombinacije snage  $P$  (kW) i brzine vrtnje  $n$  ( $\text{min}^{-1}$ ) stroja, što omogućava određivanje optimalnog poriva broda.

Krivulja porivne snage u ovisnosti o brzini vrtnje tzv.  $\alpha$  krivulja, odnosno krivulja konstantne brzine broda definirana je izrazom:

$$P = P_{ref} \left( \frac{M}{M_{ref}} \right)^\alpha,$$

gdje je:

- $P$  - snaga poriva pri  $n$
- $P_{ref}$  - snaga poriva pri  $n_{ref}$
- $M$  - odabrana brzina vrtnje
- $M_{ref}$  - referentna brzina brodskog vijka.

Za brodove za prijevoz generalnog tereta, brodove za rasuti teret i tankere, vrijede sljedeće  $\alpha$  vrijednosti :

- $\alpha = 0,15$  za brodove nosivosti do 10.000 dwt.,
- $\alpha = 0,20$  za brodove nosivosti od 10.000 do 30.000 dwt.,
- $\alpha = 0,25$  za brodove nosivosti veće od 30.000 dwt.

Na osnovi analize  $\alpha$  krivulje, mogu se usporediti različite alternative pogonskog stroja pri različitim brzinama vrtnje. Svi pogonski strojevi, čiji porivni četverokut presijeca  $\alpha$  krivulju zadovoljavaju sa stanovišta porivne snage i radnog područja motora. Nekada je broj pogonskih strojeva, čije je porivne četverokute presijecala  $\alpha$  krivulja bio skroman, pa je brodar – brodogradilište bilo prisiljeno birati između raznih tipova strojeva, koji su se znatno razlikovali u snazi, brzini vrtnje i potrošnji. Danas je izbor znatno bolji, budući da postoji kontinuirano preklapanje porivnih četverokuta različitih tipova pogonskih strojeva, što omogućava odabir koji odgovara zahtjevima s gledišta snage i brzine vrtnje.

Porivni dijagram (slika 8.), konstruira se na temelju karakteristika poriva i radnih točaka porivnog stroja. Točka odabrane brzine  $M$  mora biti unutar ili na graničnim crtama dijagrama. Ako taj uvjet nije ispunjen, brzina vrtnje vijka se mijenja ili se odabire drugi tip porivnog stroja.

Na dijagramu su apscisa i ordinata izražene u postocima, a vrijednosti su izvedene u logaritamskoj raspodjeli, tako da su krivulje funkcije snage, kao što su karakteristika brodskog vijka, krivulja konstantnog srednjeg efektivnog tlaka i krivulje konstantne brzine broda, prikazane ravnim crtama. Linije dijagrama

predstavljaju granične crte za područje u kojemu bilo koja točka može biti izabrana kao optimalni porivni stroj (Tab. 1.).

Granične crte definirane su:

|             |                                                                          |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------|
| $L_1 - L_2$ | nominalna brzina vrtnje porivnog stroja ( $100\% \text{ min}^{-1}$ )     |
| $L_1 - L_3$ | nomin. srednji efektivni tlak crtan kroz 100% snage i 100% brzine vrtnje |
| $L_3 - L_4$ | 75% nominalne brzine vrtnje                                              |
| $L_4 - L_2$ | 64% srednji efektivni tlak.                                              |

Tabela 1. Granične točke porivnog dijagrama

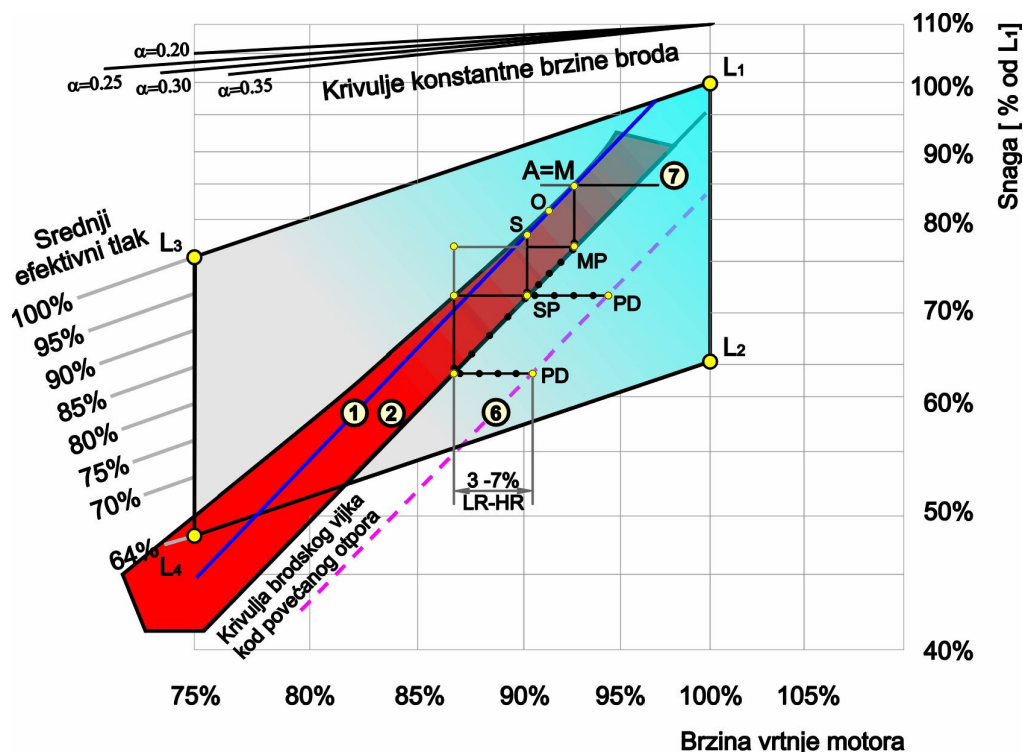
| Oznaka | Snaga | Srednji efektivni tlak | Brzina vrtnje |
|--------|-------|------------------------|---------------|
| $L_1$  | 100%  | 100%                   | 100%          |
| $L_2$  | 64%   | 64%                    | 100%          |
| $L_3$  | 75%   | 100%                   | 75%           |
| $L_4$  | 48%   | 64%                    | 75%           |

Početak izbora započinje u točki PD, presjecištu lagane krivulje vijka 6 s proračunskom potrebnom snagom. Dobivenu točku je potrebno zbog utjecaja vremena i obrastanja broda produžiti na lijevo za 3 do 7% (ovisno o motoru i tipu broda) na teškovičanu krivulju 2, budući da se s povećanjem snage motora smanjuje brzina. Za zadržavanje brzine potrebno je cca. 15% povisiti porivnu snagu motora. Time brzina obraslog broda ostaje ista, a po karakteristici teže vijčane krivulje 2 dolazimo u točku MP. Točka SP je točka rada motora u slabim vremenskim uvjetima i velikom obrastanju trupa i vijka broda. Uobičajeno je snaga motora u točki SP 90% maksimalne porivne snage motora (snaga koju motor po propisima mora održati jedan sat).

Ukoliko je brodski strojni kompleks opremljen s osovinskim generatorom, potrebno je ucrtati maksimalnu snagu osovinskog generatora, tj. iz točke SP povući vertikalnu do karakteristike motora s velikim opterećenjem da se dobije točka S koja predstavlja najveće stvarno opterećenje motora SCSR<sup>6</sup>. Istim

<sup>6</sup> Specified Continuous Service Rating

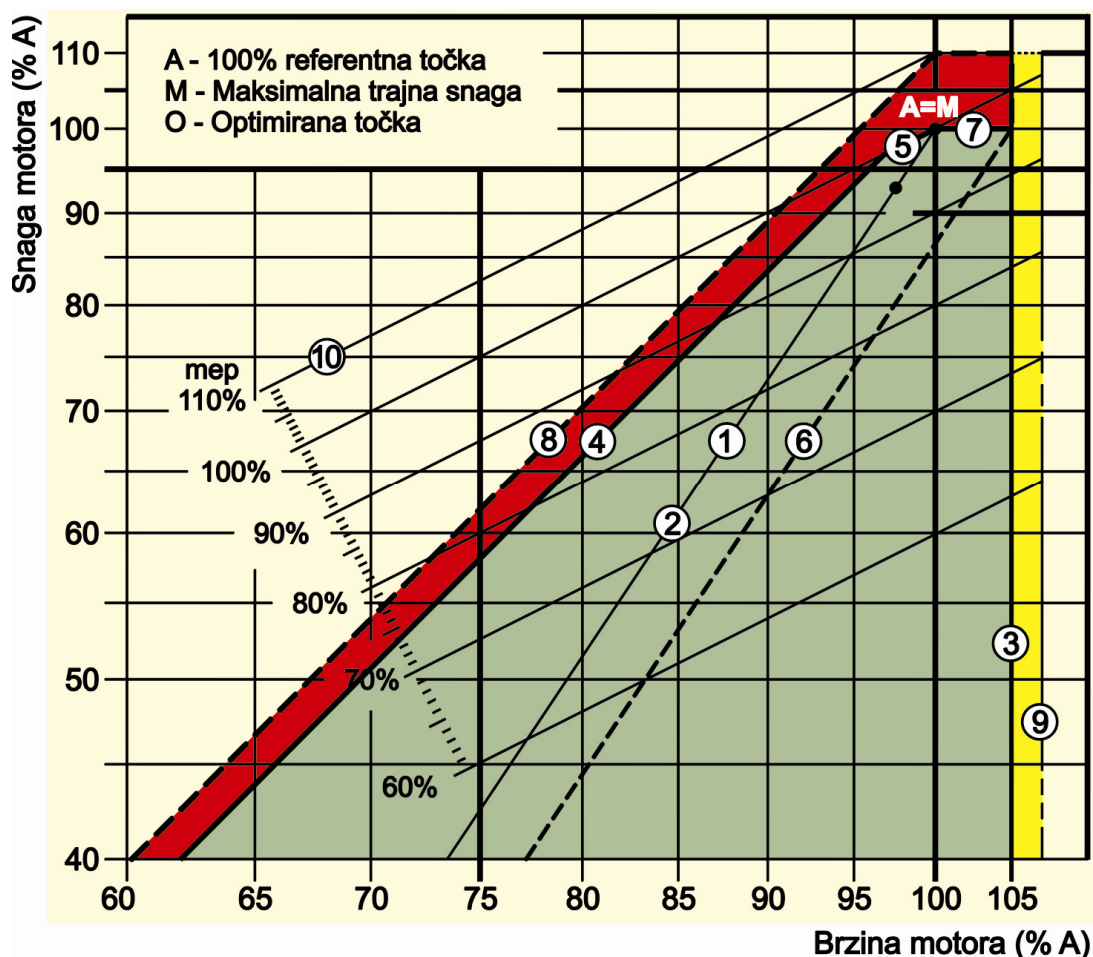
postupkom dobiva se točka M maksimalnog opterećenja motora SMCR<sup>7</sup>. Optimalna točka djelovanja O je na crti teže vijčane karakteristike i nalazi se između točaka M i S. Obično je na 85% a točka M na 100% snage motora. Ukoliko odabrana točka leži između 93,5 i 100% M, još uvijek se motor može preopteretiti do 110%. Ukoliko odabrana točka O leži previsoko, točka M će najčešće pasti izvan ograničenog dijagrama, pa je u tom slučaju potrebno izabrati iz kataloga drugi tip motora (ili se doda još jedan stap), tako da optimalna točka O leži na nižoj brzini vrtnje.



Slika 8. Određivanje optimalne točke porivnog motora – "Layout" dijagram

Ako je karakteristika brodskog vijka određena za puni deplasman, pri plovidbi broda s manjom količinom tereta, pri istoj brzini broda, potrebna snaga motora će se smanjiti, odnosno pri jednakoj brzini vrtnje, motor će biti manje opterećen, dok će s količinom tereta većom od proračunske, ploviti s tzv. "teškim" brodskim vijkom (slika 9.). To isto vrijedi i za slučaj plovidbe "teškim" morem (veliki valovi, jak vjetar, struje). Nasuprot tome, ako brod plovi s umanjenim deplasmanom (npr. samo balast), propelerski zakon se primjenjuje sada na "laganu" karakteristiku, pa se uz istu snagu povećava brzina vrtnje brodskog vijka, a time i brzina broda. Kada motor radi u normalnim uvjetima, njegova se radna točka kreće oko projektirane krivulje brodskog vijka i to se smatra normalnim režimom rada.

<sup>7</sup> Specified Maximum Continuous Rating



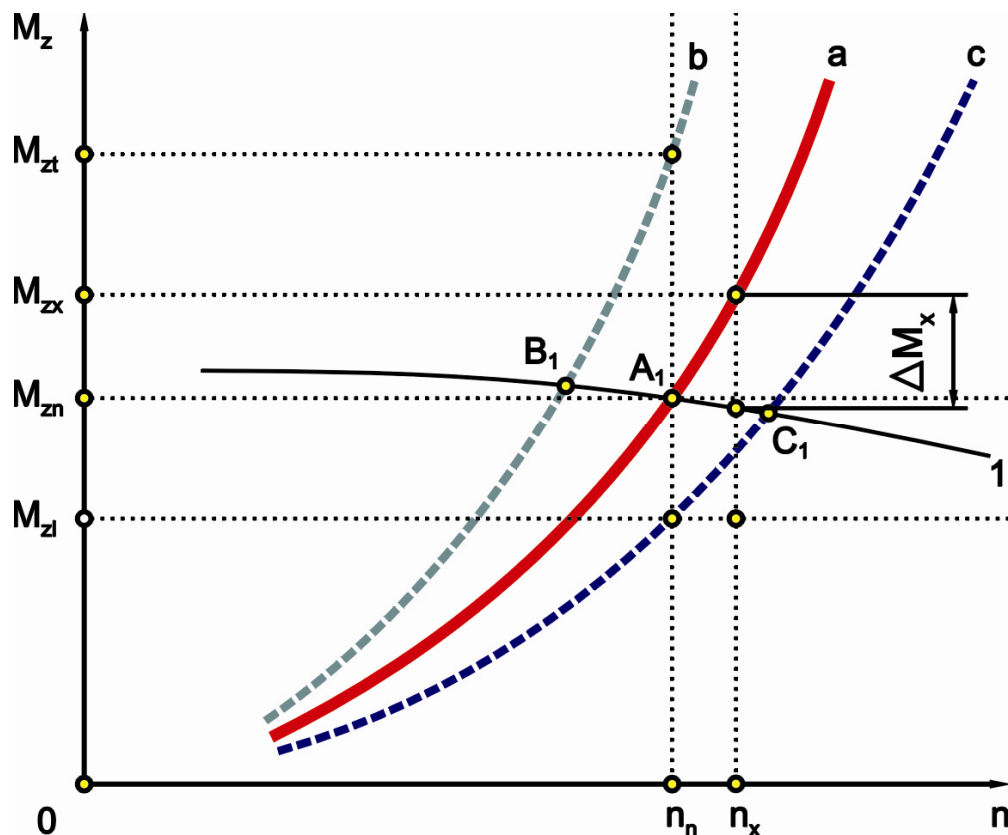
Slika 9. Radne karakteristike motora i brodskog vijka za režime plovidbe

Legenda:

- pravac 1 krivulja brodskog vijka koja prolazi kroz optimalnu radnu točku motora (O),
- pravac 2 teška propelerska krivulja (loši vremenski uvjeti, obrastao trup broda, jake morske struje – kurenat iz suprotnog smjera, plovidba uzvodno rijekama),
- pravac 3 ograničenje maksimalne brzine vrtnje motora,
- pravac 4 ograničenje momenta/brzine vrtnje motora,
- pravac 5 ograničenje srednjeg efektivnog tlaka 100% snage,
- pravac 6 krivulja "laganog brodskog vijka", čisti trup i mirno vrijeme,
- pravac 7 ograničenje snage za stalan rad motora,

- |           |                                                                                                                        |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| pravac 8  | ograničenje preopterećenja motora,                                                                                     |
| pravac 9  | ograničenje brzine s probne vožnje (brzina vrtnje motora na kojem treba proraditi zaštita od prevelike brzine vrtnje), |
| pravac 10 | krivulja konstantnog srednjeg efikasnog tlaka.                                                                         |

Režim rada dizelskog motora karakteriziran je brzinom vrtnje i srednjim efektivnim tlakom, kao i promjenama drugih važnih parametara motora s opterećenjem koje za porivni motor određuje dinamika brodskog vijka [67]. Za različite režime plovidbe broda, zakretni moment motora i brodskog vijka su ovisni o brzini vrtnje motora (slika 10.). Brodski vijak s fiksnim krilima može u plovidbi održavati istu brzinu vrtnje motora ukoliko je prosječni zakretni moment motora u ravnoteži sa zakretnim momentom vijka, uzimajući u obzir otpore osovinskog voda. Sjecište nominalne karakteristike brodskog vijka (krivulja a) s karakteristikom zakretnog momenta motora (krivulja 1), pri nominalnoj brzini vrtnje, određuje nominalni zakretni moment motora  $M_{zn}$  (točka  $A_1$ ). Narušavanje ravnotežnih uvjeta ima za posljedicu promjenu brzine vrtnje motora u odnosu na brzinu vrtnje koja odgovara postavljenom položaju ručice za količinu goriva (točka  $B_1$  za "teški brodski vijak" ili  $C_1$  za "laki brodski vijak").



Slika 10. Ovisnost zakretnog momenta motora i brodskog vijka o brzini za razne režime

|            |                                                                                                     |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| krivulja a | zakretni momenti proračunskog brodskog vijka pri promjeni brzine vrtnje motora,                     |
| krivulja b | momenti pri plovidbi s “teškim brodskim vijkom”,                                                    |
| krivulja c | momenti pri plovidbi “lakim brodskim vijkom”,                                                       |
| krivulja 1 | raspoloživi zakretni momenti dizelskog motora za nominalnu snagu pri promjeni brzine vrtnje motora. |

Sposobnost dizelskog motora da uspostavi narušeni režim plovidbe, bez djelovanja na ručicu goriva, naziva se stabilnost rada [66]. Za slučaj poremećaja, koji za posljedicu ima povećanje brzine vrtnje s  $n_n$  na  $n_x$  (npr. zbog smanjenog opterećenja motora), pri čemu zakretni moment brodskog vijka postaje za  $\Delta M_x$  veći od raspoloživog momenta motora, taj će višak djelovati kočće, odnosno smanjiti će se brzina vrtnje motora i time ga stabilizirati. Slijedi da je dizelski motor koji pogoni brodski vijak, po svojoj prirodi stabilan sustav. Međutim, zbog često promjenljivih i nepredvidivih stanja u plovidbi broda, stabilnost poriva može se narušiti, pa se javlja potreba za primjenom automatskog regulatora, koji će regulacijom dobave goriva održavati stabilnost i u težim situacijama i neće dopustiti da se brzina vrtnje poveća za više od 10 do 15 % iznad nominalnog. Brodski porivni motori s propelerskim opterećenjem koriste tip tzv. sverežimnih regulatora, koji omogućavaju rad u svakom postavljenom režimu, odnosno radnoj točki, od praznog hoda do punog opterećenja. Za regulator se definira stupanj nejednolikosti regulacije brzine vrtnje motora:

$$\delta_n = \frac{n_{\max} - n_n}{n_{sr}},$$

gdje je :

$n_{\max}$  - maksimalna brzina vrtnje,

$n_n$  - minimalna brzina vrtnje,

$n_{sr}$  - srednja brzina vrtnje,

$$n_{sr} = \frac{n_{\max} + n_n}{2}.$$

Stupanj nejednakosti regulacije veći je kod režima rada s manjom brzinom vrtnje.



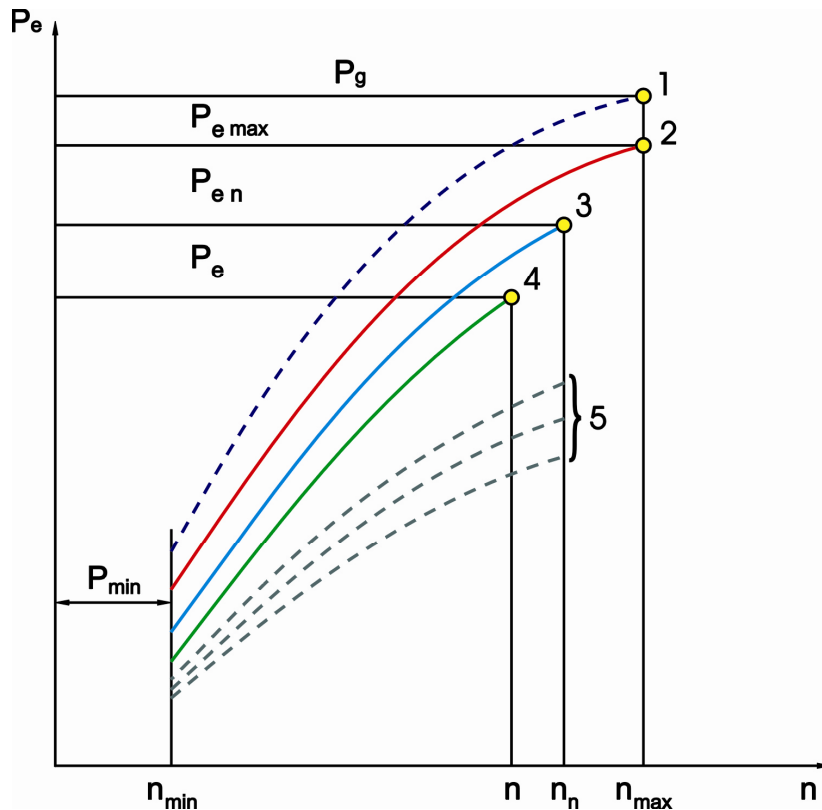
### 2.3. Brodski porivni dizelski motor

Za konačnu odluku o izboru porivnog stroja najčešće je mjerodavna ekonomičnost eksploatacije broda kao cjeline. Stoga se odluka o izboru porivnog stroja mora donijeti na temelju detaljne analize eksploatacijskih troškova i pomnog prosuđivanja prednosti i nedostataka pojedinih tipova strojeva. Parametri potrebni za proračun troškova su težina porivnog sustava, dimenzije strojarnice, cijena porivnog sustava te potrošnja goriva, čiji trošak je jedan od najvećih troškova u eksploataciji broda. S gledišta eksploatacijskih troškova, utjecajan faktor je rok trajanja porivnog stroja do generalnog popravka. Ovaj rok ovisi o nizu čimbenika, kao što su brzina vrtnje, brzina stapa, temperatura plinova izgaranja, vrsta materijala, kvaliteta goriva i maziva itd. Eksploatacija brodskih porivnih dizelskih motora s neposrednim ili posrednim djelovanjem preko mehaničkog prijenosa ima mogućnost neprekidnog mijenjanja režima rada pod utjecajem vanjskih faktora. U tim uvjetima potrebno je izabrati takav režim rada pri kojem će se događati optimalno protjecanje radnog procesa, uz visoku ekonomičnost rada i dopuštenu razinu mehaničkih i toplinskih opterećenja pojedinih dijelova i motora u cjelini.

Režim rada dizelskih motora određen je nizom tehničko-eksploatacijskih pokazatelja. Karakteristike motora mogu biti predložene grafički ili analitički, a predstavljaju međusobnu ovisnost raznih parametara motora, kao što je ovisnost efektivne ili indicirane snage o brzini vrtnje koljeničaste osovine ili o opterećenju motora. Tijekom eksploatacije snima se indicirana snaga motora, gdje se pomoću vanjske karakteristike ostvaruje veza između osnovnih tehničko-eksploatacijskih pokazatelja rada motora i njegove brzine vrtnje. Snimanje se obavlja pri konstantnom položaju mehanizma za regulaciju dobave goriva. Površina ispod vanjske karakteristike, ograničena je okomicom, koja odgovara minimalnoj brzini okretanja i područjem mogućih režima rada motora u eksploataciji.

Vanjska karakteristika može se odrediti za različite efektivne snage dizelskih motora (slika 11.). Granična snaga  $P_g$  ili "apsolutna vanjska karakteristika" je maksimalna snaga koju dizelski motor može uopće razviti pri pojedinim brzinama vrtnje. Plovidba pri razvijanju granične snage nije dopuštena, jer je motor preopterećen te mogu nastati teške posljedice (krivulja 1). Maksimalna snaga  $P_{e\ maks.}$  je najveća dopuštena snaga pri pogonu DM. Trajanje uporabe te snage ograničeno je od proizvođača i obično iznosi do jednog sata (krivulja 2).

Upotrebljava se samo u nuždi za izbjegavanje kvara broda. Maksimalna trajna snaga  $P_{en}$  određuje maksimalnu efektivnu snagu koju DM može trajno razvijati bez ograničenja i bez posljedica za motor.



Slika 11. Vanjske karakteristike dizelskih motora

Ta snaga je 10% manja od maksimalne i naziva se nominalna snaga motora, (kriv. 3), a brzina vrtnje koja se postiže, nominalna brzina vrtnje ( $n_n$ ). Ekonomska snaga  $P_e$  je manja od nominalne, a osigurava trajno siguran rad pri visokom stupnju ekonomske iskoristivosti, te je za približno 10% manja od  $P_{en}$  (krivulja 4), a potrošnja goriva se kreće oko najekonomičnijeg potroška. Minimalna snaga motora  $P_{min}$  definira snagu koju motor može razviti pri minimalnoj još stabilnoj brzini vrtnje.

Pri ocjeni tehničko-eksploatacijskih karakteristika dizelskih motora obično se traže brzinske i težinske karakteristike. Pod brzinskim karakteristikama podrazumijeva se ovisnost osnovnih parametara radnog procesa o brzini okretanja, odnosno:

$$P_e = f(n); \quad P_i = f(n); \quad b_e = f(n),$$

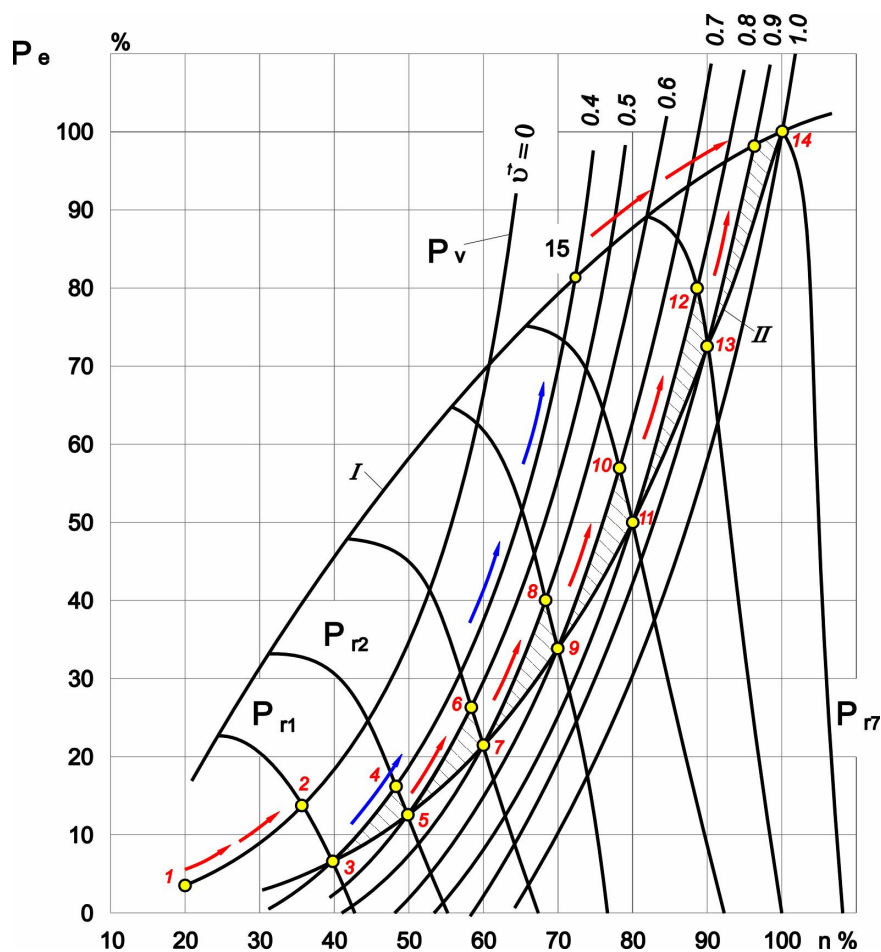
gdje je:

$b_e$  - specifični efektivni potrošak goriva [ kg/kW h].

Osnovne karakteristike koje mora zadovoljiti porivni stroj su:

- mogućnost promjene brzine vrtnje u širokom rasponu od najmanjeg do najvećeg,
- mogućnost sigurnog pokretanja u kratkom vremenu,
- mogućnost rada pri maloj brzini vrtnje,
- sigurno upućivanje u toplom ili hladnom stanju,
- siguran rad pri valjanu, odnosno posrtanju broda itd.

Kod porivnog sustava s brodskim vijkom s fiksnim krilima i neposrednim djelovanjem, za vrijeme upućivanja dizelskog motora istodobno započinje okretanje brodskog vijka. Tijekom ubrzavanja mijenja se opterećenje porivnog stroja (Slika 12.).



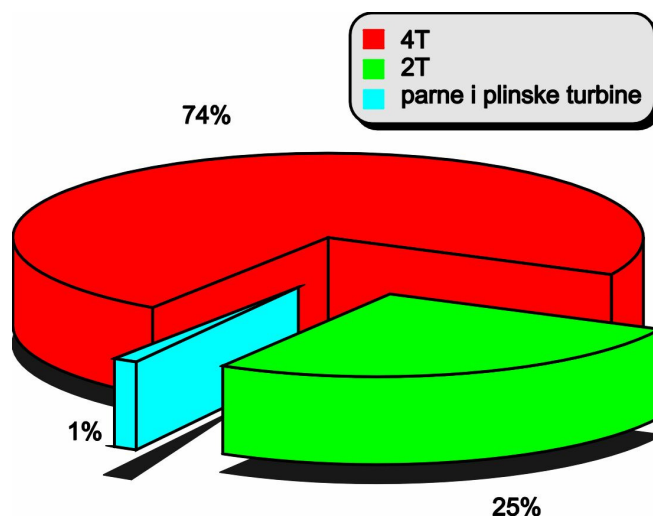
Slika 12. Promjena opterećenja dizelskih motora za vrijeme ubrzanja broda

Kako je u prvom trenutku brzina broda nula, opterećenje dizelskog motora mijenjat će se po “teškoj” karakteristici brodskog vijka  $P_v$ , do presjeka s karakteristikom regulatora  $P_M$  (1-2), što odgovara određenom položaju ručke upravljanja regulatora. Povećanjem brzine broda, opterećenje se smanjuje prema regulacijskoj karakteristici (2-3). U točki 3 završava ubrzanje broda do brzine određene normalnom karakteristikom brodskog vijka. Daljnje ubrzanje do postizanja zahtijevane brzine često se ostvaruje postepeno prema odsječcima 3 do 5, ... 13 do 14. Da bi se navedeno ostvarilo potrebno je postepeno pomicati ručku upravljanja sverežimnog regulatora u niz međupoložaja koji odgovaraju odgovarajućim regulacijskim karakteristikama. U svakom položaju potrebno je zadržati ručku dok se ne postigne odgovarajuća brzina broda i odgovarajuće toplinsko stanje motora.

Osnovni energetske i ekonomski pokazatelji brodskog dizelskog motora su efektivna snaga  $P_e$ , moment na vratilu brodskog vijka  $M_e$ , efektivni tlak  $p_e$  i specifična potrošnja goriva  $b_e$ , a ovise o nizu parametara radnog procesa. Promjene osnovnih pokazatelja određuju se funkcionalnom ovisnosti parametara radnog procesa o uvjetima eksploatacije. Parametri procesa s druge strane ovise o ukupnom djelovanju eksploatacijskih i konstrukcijskih faktora, tehničkom stanju motora i uvjeta okoline.

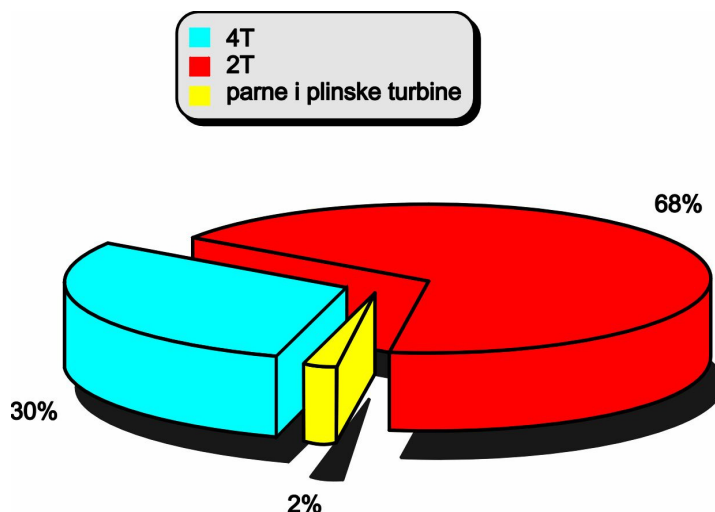
## 2.4. Primjena porivnih dizelskih motora u pomorstvu

U današnje vrijeme, još uvijek, dizelmotorni pogon broda ima dominantnu ulogu u pomorstvu (Slika 13.) [38].



Slika 13. Zastupljenost pogonskih strojeva u pomorstvu (po broju)

Prema instaliranoj snazi dominiraju dvotaktni dizelski motori, dok četverotaktni dizelski motori zadržavaju tradicionalnu zastupljenost na manjim brodovima i brodovima specijalnih namjena, kao što su brodovi za prijevoz kontejnera, trajekti i brodovi koji imaju dizel-električni poriv (Slika 14.) [39]. Prednost dizelmotorne propulzije očituje se brojnim čimbenicima, osobito u niskoj potrošnji goriva pri gotovo svim pogonskim uvjetima, bez obzira na veličinu stroja.



Slika 14. Zastupljenost pogonskih strojeva u pomorstvu (po instaliranoj snazi)

Sporookretni dizelski motori su najdjelotvorniji i ujedno omogućavaju dobar spoj s brodskim propulzorom, te postižu efikasnu propulziju. Uglavnom se ugrađuju prekretni sporookretni dizelski motori, budući da su u eksploataciji povoljniji zbog manje osjetljive i trajnije konstrukcije, veće sigurnosti u pogonu i duže eksploatacije do generalnog popravka, te relativno niske potrošnje goriva od oko 158 g/kW. Efektivni stupanj iskoristivosti u današnje vrijeme im se kreće oko 53%. Istraživanja jednog od vodećih svjetskih proizvođača brodskih dizelskih motora (MAN B&W) od 1974. do 1998. g. [39], ukazuju na dominantnu zastupljenost sporookretnih 2-taktnih dizelskih motora (Tabele 2 i 3).

Tabela 2. Broj instaliranih porivnih dizelskih motora u periodu 1974. do 1998.

| motor  | 2 taktni |      | 4 taktni |     | nepoznat |     | ukupno |     |
|--------|----------|------|----------|-----|----------|-----|--------|-----|
| godina | broj     | %    | broj     | %   | broj     | %   | broj   | %   |
| 1974   | 731      | 91   | 62       | 7.5 | 13       | 1.5 | 806    | 100 |
| 1979   | 587      | 90.5 | 59       | 9   | 2        | 0.5 | 648    | 100 |
| 1984   | 773      | 94   | 46       | 6   | 0        | 0   | 819    | 100 |
| 1989   | 377      | 89   | 48       | 11  | 0        | 0   | 425    | 100 |
| 1994   | 466      | 91   | 44       | 9   | 0        | 0   | 510    | 100 |
| 1998   | 745      | 97   | 22       | 3   | 0        | 0   | 767    | 100 |

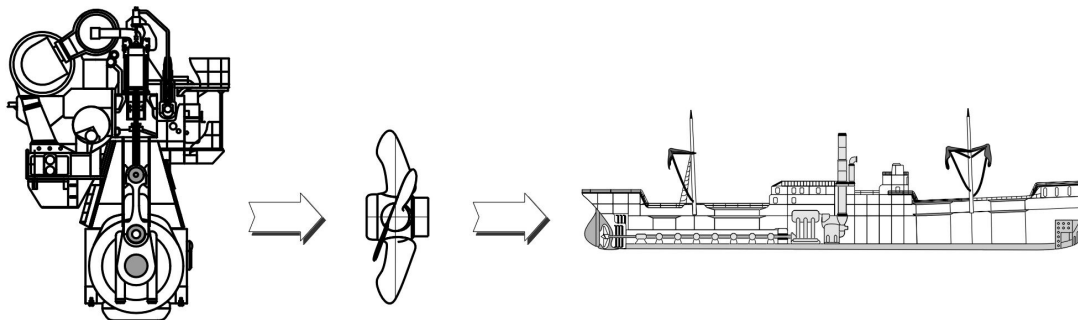
Tabela 3. Instalirana snaga (mil. KS) porivnih dizelskih motora u periodu 1974. do 1998.

| motor  | 2 taktni |    | 4 taktni |   | nepoznat |   | ukupno |     |
|--------|----------|----|----------|---|----------|---|--------|-----|
| godina | snaga    | %  | snaga    | % | snaga    | % | snaga  | %   |
| 1974   | 9.2      | 97 | 0.2      | 2 | 0.1      | 1 | 9.5    | 100 |
| 1979   | 6.4      | 98 | 0.1      | 2 | 0.0      | 0 | 6.5    | 100 |
| 1989   | 4.4      | 98 | 0.1      | 2 | 0.0      | 0 | 4.5    | 100 |
| 1994   | 7.0      | 98 | 0.1      | 2 | 0.0      | 0 | 7.1    | 100 |
| 1998   | 11.6     | 99 | 0.1      | 1 | 0.0      | 0 | 11.7   | 100 |

Iz tabela je vidljivo da su četverotaktni srednjookretni motori zastupljeni uglavnom srednjih snaga i to samo s 2% instalirane snage.

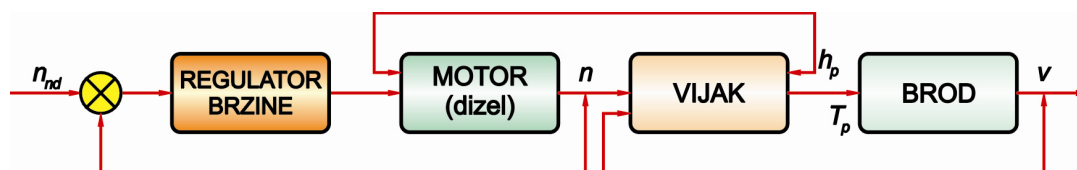
## 2.5. Model suvremenog brodskog poriva

Iz dosadašnje analize može se, bez ikakve dvojbe, zaključiti da model suvremenog brodskog poriva determinira sporookretni dvotaktni dizelski porivni motor, brodski vijak s fiksnim krilima i sam brod u međusobnoj interakciji (Slika 15.).



Slika 15. Porivni brodski sustav

Dinamiku dizelske brodske propulzije, s regulatorom brzine vrtnje i fiksnim vijkom, u strukturnoj blok shemi brodske dizelske propulzije (Slika 16.), određuju brzina broda, dinamika vijka i dinamika samoga motora. Upravljanje brzinom broda, plovidbom i manevrom ostvaruje se promjenom dinamike brodskog vijka i kormilarskog sustava, a preokret odnosno promjena smjera vožnje obavlja se promjenom smjera vrtnje brodskog vijka, prekretnim motorom.



Slika 16. Struktura sustava brodske dizelske propulzije

Iz prikazane strukture slijedi model motora i njegove regulacije brzine vrtnje [22]. Preko regulatora utječemo na promjenu količine goriva u motoru, promjenom količine goriva mijenja se brzina vrtnje motora  $n$  i porivna sila vijka  $T_p$ . Razvijeni moment i porivna sila brodskog vijka, funkcija su uspona  $h$ , brzine vrtnje  $n$  i brzine napredovanja brodskog vijka kroz more  $v$ , pa slijedi:

$$M_p = f_{MP}(h, n, v) \text{ i}$$

$$T_p = f_{TP}(h, n, v).$$

Otpor gibanju broda kroz more izražava se krivuljom koja se za određeni brodski trup dobiva eksperimentalnim putem (Slika 9., pravac 6).

## 2.6. Zalihost poriva broda

Zalihost broda predstavlja konfiguraciju brodskog sustava koja osigurava sposobnost broda da izbjegne zastoje ili kvar kada neka od njegovih komponenti iznevjeri. Zalihost se pojavila kao posljedica pomorskih kvarova, budući da su unatoč svim tehnološkim dostignućima na mnogim područjima, kvarovi još uvijek prisutni. Kvarovi na tankerima uzrokuju gubitak vremena, u nekim slučajevima gubitak tereta, a kao posljedicu imaju velike ekološke katastrofe. Stoga su zahtjevi za povećanom zalihošću i to osobito brodskog pogonskog postrojenja logična posljedica. Pritom moramo imati na umu da se brod može zaustaviti samo uz pomoć pogonskog postrojenja, štoviše brod bez poriva nema niti sposobnost upravljanja, te je prepušten silama prirode.

Stoga klasifikacijska društva (registri) preporučuju za propulziju tri razine, odnosno klase zalihosti. Budući da ta pravila nisu još obvezatna, izgradnja takvih redundantnih sustava ovisi isključivo o željama i mogućnosti brodovlasnika.

### 2.6.1. Propisi koji se odnose na sustav poriva broda

Minimalni uvjeti za izvedbu sustava poriva i njegovih podsustava na pomorskim brodovima propisani su SOLAS<sup>8</sup> konvencijom, gdje su zahtjevi strojarskih i elektrauređaja zajedno obrađeni.

Pravila strojnih uređaja u poglavlju C dijele brodove u dvije skupine:

- trgovački i
- putnički brodovi.

Za navedene skupine propisuje se poseban nadzor i zalihost za vitalne sustave brodske propulzije:

- proizvodnja električne energije
- sustav pare
- sustav vode za kotao
- sustav goriva za kotao i motor
- sustav podmazivanja motora
- sustav hlađenja motora
- sustav zraka za kotao ložen naftom
- sustav komprimiranog zraka za upućivanje motora
- hidraulički, pneumatski i električni sustav za nadzor i upravljanje.

---

<sup>8</sup> *Safety of Life at Sea*



Sustav poriva mora omogućiti ponovnu uspostavu pogona od potpunog prestanka rada, bez vanjske pomoći. Svi uređaji moraju biti tako konstruirani, da ispravno djeluju u stanju  $15^\circ$  poprečnog statičnog nagiba broda,  $22,5^\circ$  dinamičnog nagiba broda, te pod kutem od  $7,5^\circ$  uzdužnog nagiba broda.

Svaka izvedba poriva mora brodu omogućiti vožnju krmom u svim uvjetima plovidbe.

Glavni izvor električne energije mora imati dva agregata. Ukoliko je jedan u kvaru, drugi se automatski starta i preuzima potrošače kormilarskog sustava, rasvjetu i vitalne potrošače porivnog sustava.

Generator u nuždi treba biti (ukoliko je to moguće) postavljen na nepropusnu pregradu. Raspoloživa snaga generatora u nuždi mora zadovoljiti održavanje vitalnih sustava u sljedećem razdoblju:

- sustav rasvjete u bitnim prostorima – 18 h
- navigacijska svjetla – 18 h
- komunikac. i navigac. uređaji i uređaji za otkrivanje i dojavu požara – 18 h
- protupožarna pumpa – 18 h
- rasvjeta oko čamaca za spašavanje – 3 h
- napajanje kormilarskog sustava – 30 min.

Električna energija u nuždi može biti dobivena iz akumulatora ili agregata. Ukoliko se radi o agregatu, mora biti sposoban za samostalno upućivanje pri temperaturi od  $0^\circ\text{C}$ , a ako s upućuje s akumulatorom, mora imati mogućnost najmanje tri uzastopna upućivanja.

U Konvenciji nema nikakvih propisa vezanih uz zalihost sustava propulzije, pa se unatoč svim propisima međunarodnih konvencija, klasifikacijskih društava i ustanova, nesreće još uvijek događaju. Veći broj pomorskih nesreća bile bi spriječene, ukoliko bi brodovi imali zalihost sustava propulzije i kormilarenja. U periodu od 1974. do 1994. godine, 30% tankera većih nosivosti, izgubljeno je zbog kvara u strojarnici.

## 2.6.2. Zalihost brodskog porivnog stroja

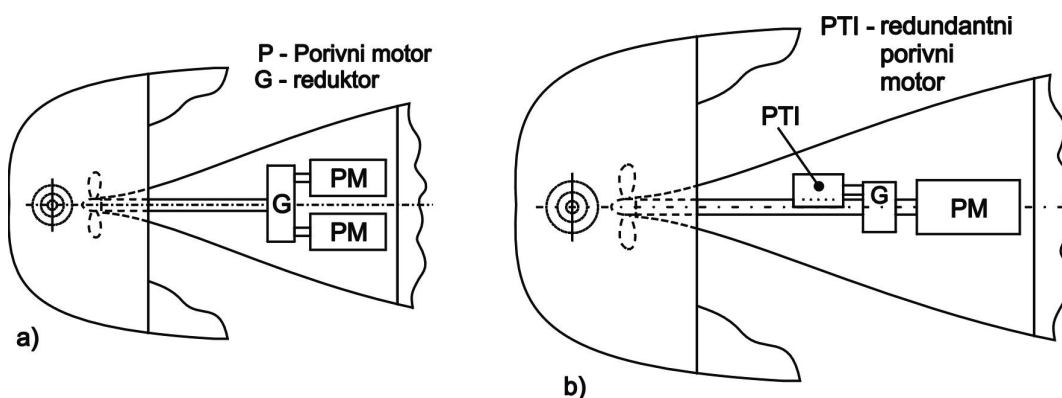
Zbog neizbježnih kvarova glavnog porivnog stroja, koje će uzrokovati prestanak brodskog pogona, te moguće velike štete, koje na kraju budu na teret klasifikacijskih i osiguravajućih društava, ista uvode nove propise za zalihost porivnog uređaja broda. Ti propisi međutim još nisu obavezujući, već služe samo kao preporuka brodarima.

Najveći registri koji su usvojili pravilnike o zalihosti propulzije su:

- Det Norske Veritas (DNV), siječanj 1996. g.
- Registro Italiano Navale (RINA), siječanj 1996. g.
- American Bureau of Shipping (ABS), srpanj 1997. g.
- Lloyd's Register of Shipping (LR), veljača 1999. g.
- Germanische Lloyd (GL), kolovoz 2000. g.

Germanische Lloyd je svojim novim pravilom 14 "Redundant Propulsion and Steering Sistem", podijelio sustave zalihosti u tri skupine i to RP1 (Slika 17.), RP2 i RP3 (Slika 18., 19.).

Svaka se skupina razlikuje u ostatku raspoložive snage za poriv broda nakon prestanka rada glavnog stroja. Posebna pozornost dana je skupini RP1 20%, koja predstavlja dvadesetpostotnu zalihost snage glavnog porivnog stroja. Sve tri skupine moraju zadovoljiti manevriranje broda u nevremenu<sup>9</sup>. Minimalna brzina broda mora biti u normalnim<sup>10</sup> vremenskim uvjetima i u području brzine od 7 čvorova, odnosno 50% od normalne brzine.



Slika 17. Zalihost klase RP1 X%

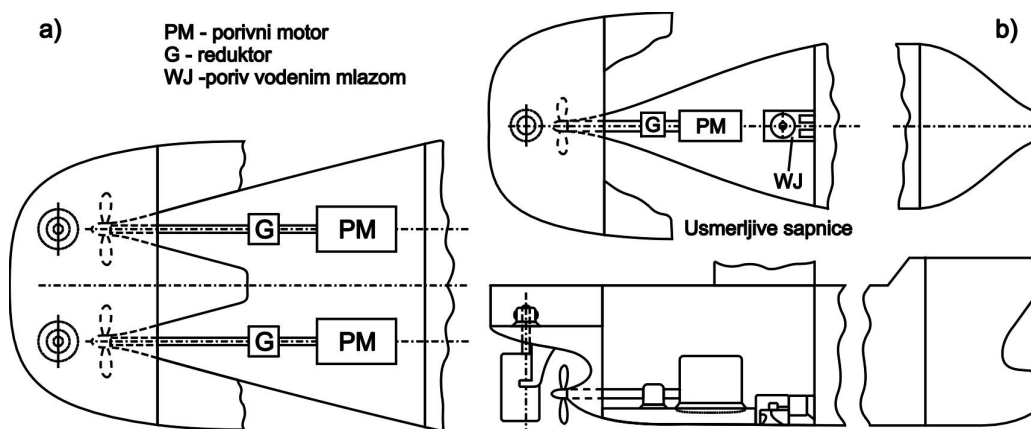
<sup>9</sup> Ako je brzina vjetrova 21 m/s, odnosno do stupnja 8 po Beaufort-ovoj skali i kada je visina mora 5,4 m od poprečnog perioda vala 8,3 s.

<sup>10</sup> Kada je brzina vjetrova 11 m/s, odnosno do stupnja 5 po Beaufort-ovoj skali i kada je visina mora 2,8 m od poprečnog perioda vala 6,7 s.

Zalihost porivnog sustava mora biti sposobna pokretati brod pod navedenim uvjetima u periodu koji nije manji od 72 sata.<sup>11</sup>

Brod može dobiti uporabnu dozvolu za zalihost klase RP1 X% ukoliko ima dva neovisna porivna sustava. Ne zahtijeva se zalihost propulzora, osovine, reduktora i kormilarskog sustava. Predviđena je mogućnost izvedbe poriva s dva motora PM, koji su preko zupčanog prijenosa G, vezani na jednu pogonsku osovину brodskog vijka, te izvedbe s osovinskim generatorom PTI<sup>12</sup>, kojeg pri prestanku rada motora može pokretati agregat. Za uspješnu propulziju potrebno je imati posebnu spojku za odvajanje porivnog stroja od osovine brodskog vijka. Sustav sa dva porivna motora obično daje zalihost snage od 50%, dok sustav s jednim porivom daje obično zalihost od 30% snage poriva.

Skupina s oznakom RP2 X% (Slika 18.) predstavlja brodski strojni kompleks s dva porivna motora i dva osovinska voda, ili je ugrađen sustav s jednim dizelskim motorom za normalnu propulziju i jednom porivnom jedinicom tzv. W.J.<sup>13</sup>, koji djeluje na principu vodenog ejektorskog tlaka i protoka. Propulzija s vodenim protokom mora obuhvatiti pokretnu sapnicu za usmjeravanje broda.



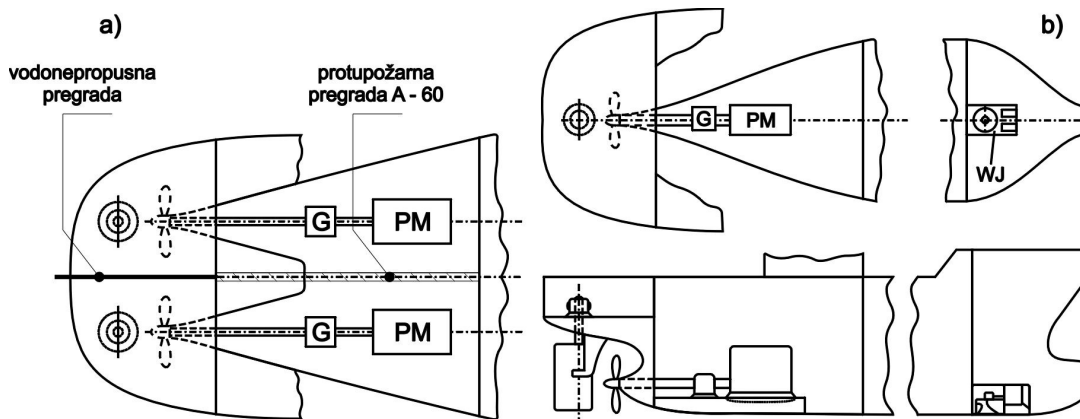
Slika 18. Zalihost skupine RP2 X%

Najveću moguću redundanciju skupine RP3 X% (Slika 19.) dobiva brod, koji ima dva pasivna porivna motora i dvija neovisna osovinska voda. Sustav je sličan sustavu RP2 X%, no ovdje se zahtijeva nepropusnost pregrada kormilarskog sustava i postojanost požarne pregrade klase A-60 po SOLAS konvenciji.

<sup>11</sup> Za brodove koji plove manje od 72 sata između dvije luke, ovo vrijeme može se smanjiti za vrijeme navigacije.

<sup>12</sup> Power Take In – dodatna snaga porivnog motora

<sup>13</sup> W.J. – Water Jet – propulzija sa vodenom mlaznicom



Slika 19. Zalihost skupine RP3 X%

Prekid opskrbe električnom energijom na brodu, u velikoj većini slučajeva dovest će do prestanka poriva broda, zbog prestanka rada dvotaktnog sporookretnog dizelskog motora, stoga će se daljnja razmatranja u ovom radu usredotočiti na mogućnost iznalaženja modela sustava zalihosti proizvodnje potrebne količine električne energije za opskrbljivanje glavnog motora i ponovnu uspostavu poriva broda.

## 2.7. Električna energija na brodu

Električna se energija na brodu uglavnom proizvodi na jednom mjestu, što znači da plovni objekti imaju električnu centralu koncentriranu na jednom prostoru. Kod specijalnih objekata, gdje je sigurnost i raspoloživost električnog sustava od presudne važnosti (kao što su to objekti za spašavanje, gašenje požara i ratni brodovi) električna centrala može biti podijeljena u dva odvojena dijela.

Snaga električne centrale ovisi o veličini sustava, vrsti i namjeni broda, a određuje se na osnovi bilance električne energije, odnosno zahtjeva ukupne potrošnje električne energije na jednom plovnom objektu.

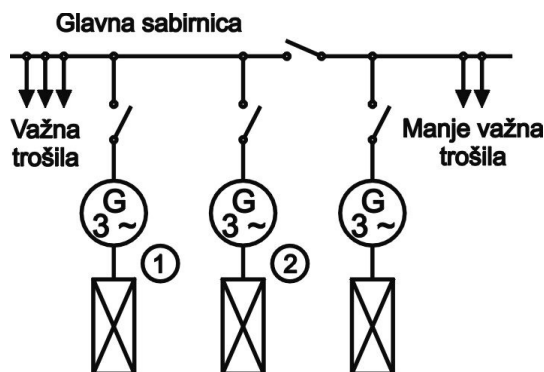
Po propisima klasifikacijskih ustanova, na svakom prekoceanskom brodu moraju biti instalirana, pored izvora u nuždi, najmanje dva glavna izvora električne energije, od kojih jedan radi, a drugi je u pričuvi. Radni izvor električne energije definiran je tako da zadovoljava kompletno opterećenje broda po bilanci električne energije tijekom plovidbe. Oba generatora, bez izuzetaka, moraju biti pokretana vlastitim pogonom.

Zbog pouzdanosti, ekonomičnosti, te sigurnosti plovidbe, generatori su najčešće pogonjeni dizelskim motorima.

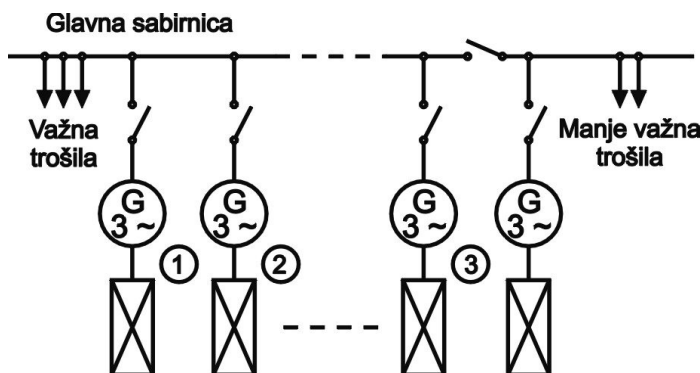
Po zahtjevima registara, oba motora i generatora moraju biti istih tehničkih karakteristika, a osim njih na brodu treba biti još jedan motor u pričuvnim dijelovima za rezervu navedenih generatora. Praksa je pokazala, da se pričuvni dijelovi na brodu neadekvatno održavaju, pa mnogi brodovlasnici ugrađuju treći dizelski generator. U tom slučaju brod ne treba imati rezervnih dijelova za dizelski generator.

Tijekom proteklih godina, proizvođači dizelskih motora su sustavno razvijali i unapređivali motore, sa željom da im se poboljša pouzdanost tijekom eksploatacije, a ujedno su to nastojali uskladiti s pogoršanjem kvalitete goriva, smanjenjem održavanja, buke i zagađenja okoliša.

Osovinski generator i turbinski generator nisu uračunati u navedene izvore električne energije, te služe samo kao dopunski izvor. Stoga, snaga dizelskog generatora mora biti odabrana tako da, kod kvara jednog dizelskog generatora, drugi automatski starta i postepeno se opterećuje, preuzimajući važne potrošače u pogonu za vrijeme plovidbe, u manevriranju, u luci, prilikom prodora vode, požara i sl. Iz navedenoga slijede različite izvedbe električnih centrala na brodu, od izvedbe (Slika 20.) koja samo zadovoljava propise registara, do mnogo sofisticiranijih izvedbi (Slika 21.).



Slika 20. Dva dizelska generatora i generator za nuždu

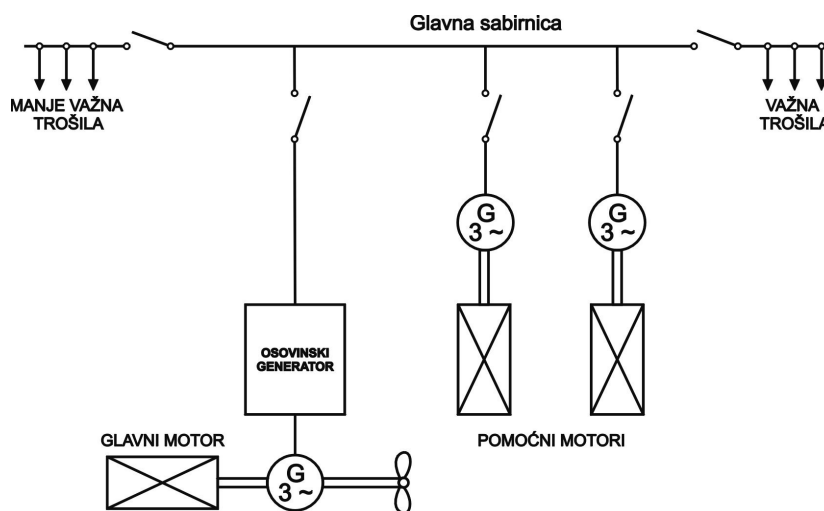


Slika 21. Tri dizelska generatora i generator za nuždu

Korištenje osovinskog generatora, pokretanog porivnim dizelskim motorom uz dva dizelska generatora s odvojenim pogonom (Slika 22.) započinje tijekom svjetske naftne krize, a i danas predstavlja vrlo aktualnu izvedbu. Tijekom plovidbe, glavne sabirnice napaja osovinski generator preko odgovarajućeg postrojenja, a kada osovinski generator ne radi uključuje se dizelski generator.

Iskorištavanjem otpadne topline ispušnih plinova glavnog motora i kotla loženog naftom, pojavljuje se mogućnost ugradnje turbinskog generatora u kombinaciji s dva ili više dizelskih generatora (Slika 23.). Usavršavanjem porivnog dizelskog motora temperatura ispušnih plinova se smanjuje, što ograničava proizvodnju pare na tlakove do 7 bara. Turbinski generatori koji koriste otpadnu toplinu glavnog stroja mogu raditi kao osnovni izvor električne energije, ali moraju imati regulaciju napona i frekvencije, a trebaju zadovoljavajuće raditi u paralelnom radu s dizelskim generatorima s neovisnim pogonom. Ukoliko takvi turbinski generatori napajaju samo pojedinačna trošila, mogu raditi i bez navedene regulacije. Kod modernih porivnih sustava može se

na brodu vrlo ekonomično proizvoditi električna energija kombinacijom utilizacijskog turbinskog generatora i osovinskog generatora (Slika 24).

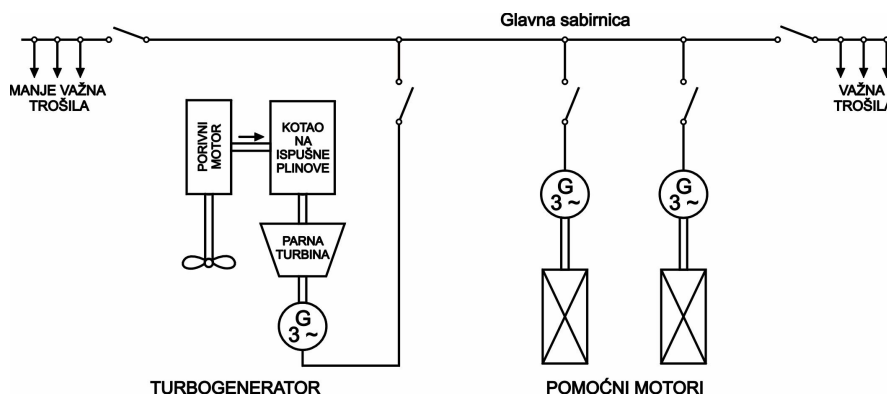


Slika 22. Dva dizelska generatora i osovinski generator

Kotao na ispušne plinove može biti povezan s kotlom loženim naftom, pa kada je brod u luci i ne rade utilizacijski kotao i osovinski generator, automatski se starta kotao ložen naftom, za dobivanje pare potrebne za rad turbinskog generatora.

Ovakav sustav većinom koriste brodovi za prijevoz kontejnera, koji se malo zadržavaju u luci pa tada turbinski generator kontinuirano radi.

Ukoliko brod u luci boravi duže vrijeme, više se isplati rad dizelskog generatora.



Slika 23. Dva dizelska generatora i turbinski generator s parnim kotlom na ispušne plinove

Iz navedenog može se zaključiti, da je koncepcija proizvodnje električne energije na brodu podijeljena u tri osnovne izvedbe, te njihove međusobne kombinacije i to:

- dva ili više istih dizelskih motora s električnim generatorima kao najčešće korištena osnovna izvedba,
- plinske i parne turbine s turbinskim generatorom, pri čemu se toplinska energija dobiva iz konvencionalnog goriva i iz ispušnih plinova,
- akumulatorske baterije za brodove s malom električnom potrošnjom i ograničenog područja plovidbe, te za brodove specijalnih namjena.

Pritom svakako treba voditi računa da se pogonska postrojenja na brodu neprekidno unapređuju, tako da im se danas pridodaju funkcije koje su ranije bile implementirane izvan sustava upravljanja, kao što su vođenje dijaloga s operatorom, upravljanje cijelim podsustavom, komunikacija s funkcijskim jedinicama na istim i različitim razinama upravljanja i autodijagnostika. Brodska postrojenja stalno su pod uvjetima izmjena i nadopuna, koje ovise o razvitku znanosti i usavršavanju brodskog kompleksa, što je u neposrednoj sprezi s iskustvima u eksploataciji i ekonomičnosti broda.



### 3. INTELIGENTNA STROJARNICA

Razvoj (optimizacija) određenog sustava može se promatrati samo u cjelini, vodeći računa da se poboljšanjima jednog podsustava, ne naškodi cijelom sustavu. Stoga treba i razvoj tzv. "inteligentnog motora" promatrati u cjelini, koja se može uskladiti s navedenim spoznajama i nazvati "inteligentnom strojarnicom". Naravno, u praksi će se to prvenstveno odnositi na "inteligentni motor", kojega se kod zakazivanja pomoćnih uređaja, potpunog ispadanja sustava za proizvodnju električne energije, ne može uputiti, te ostvariti njegovu bar vremenski ograničenu nezavisnost od sustava napajanja električnom energijom. Uvođenjem elektroničke kontrole glavnih parametara strojnog kompleksa, stvorena je baza za razvoj takozvane "inteligentne strojarnice". Takva strojarnica bi nadzirala stanje strojnog kompleksa i prilagođavala pogonske parametre, koji bi osiguravali najpovoljnije uvjete eksploatacije. Vodeći proizvođači brodskih motora već nekoliko godina rade na opisanom projektu. Paralelni se razvoj odvija kod svih podsustava koji opslužuju dizelski motor, a koji postaju sve složeniji i zahtjevniji. Zato treba dobro razmotriti procese u kojima se razvija sustav "inteligentnog motora", te predložiti moguća rješenja, a to je upravo cilj ovog istraživanja, predložiti moguća rješenja za postojeće sustave (klasične strojarnice) i sustave koji se tek razvijaju. Kako je istraživanje koncentrirano na izradu modela sustava upućivanja porivnog motora u slučaju kvara dizelskih generatora (nestanka struje za pogon sustava poriva), da bi se postigao zadani cilj, potrebno je prikazati i analizirati najnovija dostignuća .

#### 3.1. Faze razvoja sustava

Još od vremena kada su se na brodovima počeli koristiti prvi motori s unutarnjim izgaranjem kao glavni porivni strojevi, nastoji se olakšati upravljanje i nadzor nad njima. Tijekom godina to se postizalo upotrebom automatike, koja je održavala određene radne parametre ili je upravljala raznim procesima i sustavima na pogonskom stroju ili pomoćnim strojevima. Osim cilja da olakša rad u brodskom strojnom kompleksu, automatika je imala zadatak da poveća pouzdanost te onemogući stvaranje velikih kvarova. Time je automatika, osim tehnološkog razloga uvođenja na brod dobila i ekonomski značaj, smanjenje fizičkog rada, odnosno smanjenje potrebnog broja posade na brodu.

Danas, kada su elektronika i računalna tehnologija uznapredovale do neslučenih razina, automatika i automatizacija su dobile jednu potpuno novu dimenziju. Uporabom mikroprocesorske tehnologije bazirane na modernim aplikacijama (softveru), moguće je automatsku regulaciju i upravljanje svesti na

potpuno novu razinu. Svi lokalni parametri, koje je do sada nadgledala i regulirala automatika, sada su objedinjeni i time je omogućena primjena funkcionalne međuzavisnosti pojedinih parametara na brodskom motoru i pomoćnoj opremi, čime se postiže točnija i bolja regulacija te mogućnost pravovremenog otkrivanja mogućih kvarova. Ekonomske razloge koji bi opravdavali uporabu ove tehnologije nije potrebno ni naglašavati, budući da bi se time troškovi održavanja i eventualni troškovi zastoja uslijed kvarova drastično smanjili.

U zadnjih nekoliko godina najveći svjetski proizvođači brodskih motora (MAN B&W, Wartsila-Sulzer) i proizvođači automatike pristupili su razvoju sustava tzv. "inteligentnog motora". Taj sustav bi bio samo jedan od podsustava koji bi u budućnosti sačinjavao tzv. "inteligentni brod". Njegovom primjenom, bit će moguće reducirati broj kvarova na minimum, te time održavati tzv. "sustav prema stanju", što znači da će se održavanju pristupiti tek onda kada je nastupila velika vjerojatnost nastajanja kvara na nekom strojnom dijelu ili sustavu. Tako bi se bitno smanjili ukupni operativni troškovi brodara, reducirao broj članova posade, a njihov rad olakšao.

### **3.1.1. Pojam inteligencije, "inteligentnog broda i motora"**

Pojam inteligencije se do današnjih dana koristio isključivo u kontekstu čovjeka. Jedino kod čovjeka određena je jedinica za mjerenje inteligencije, tzv. *IQ* (kvocijent inteligencije) kao mjera nečije inteligencije, a da se pritom ta jedinica nikada nije dodjeljivala tehničkoj opremi.

Kao pojam, inteligencija se može definirati kao:

- sposobnost da se uči ili razumije procese u novoj ili poznatoj okolini (razum),
- sposobnost vješte upotrebe razuma,
- sposobnost da se upotrijebi znanje prilikom snalaženja u novoj okolini,
- sposobnost da se razmišlja apstraktno mjereno nekim objektivnim kriterijem,
- sposobnost da se razumije ili shvaća (razumijevanje).

Inteligentan se kao pojam može definirati:

- posjeduje ili pokazuje visok ili zadovoljavajući stupanj inteligencije i umne sposobnosti,
- pokazuje sposobnost dobre procjene ili “zdravog” razmišljanja (vještina) vođen ili upravljan razumom (razumnost),
- vođen ili nadgledan pomoću računala; upotrebljava ugrađen mikroprocesor za automatske operacije, obradu podataka ili postizavanje veće svestranosti.

Nijedna tehnologija ili tehnički sustav za sada ne može ispuniti sve ove zahtjeve, ali to ne znači da neki tehnički sustav ne možemo smatrati inteligentnim s određenim *IQ*, ili drugim riječima sustav s određenim stupnjem inteligencije. Ustvari, pojam inteligencije je u tehničkoj praksi već duže vrijeme prisutan, a trend današnje tehnologije je da se tehničkim i tehnološkim sustavima daju sposobnosti većeg stupnja inteligencije.

Inteligentni se sustavi na brodu koriste već duži niz godina, uglavnom pod nazivom automatike i automatizacije, a imaju zadatak da upravljaju strojevima, uređajima, mehanizmima, procesima i energijom na brodu bez čovjekova sudjelovanja, ali uz potpun uvid u stanje i mogućnost utjecaja na tijek događaja. Konkretni primjeri takve “inteligencije” na brodu mogu se naći u sustavima navigacije, upravljanja i manevriranja brodom, brodskim radio i telekomunikacijskim sustavima, vođenju brodskih poslova, procesima koji se odnose na brodski teret, te brodskim pogonskim i energetske sustavima.

Najviše spomenutih sustava postiže se kod tzv. strojarnice bez posade, pri čemu se upravljanje i nadzor cjelokupnog pogona u plovidbi obavlja sa zapovjedničkog mosta.

Tu se već može govoriti o osnovnim inteligentnim sustavima koji uključuju:

- automatizaciju pogonskih i pomoćnih sustava, podrazumijevajući pod time sigurno upravljanje i reguliranje porivnih, pomoćnih i električnih sustava,
- daljinsko upravljanje glavnim motorom, tj. mogućnost upravljanja sa zapovjedničkog mosta, gdje motorom upravljaju ljudi s manjim tehničkim znanjem,
- sustave koji osiguravaju sigurnost i zaštitu cjelokupne pogonske opreme,
- daljinsko mjerenje i alarmiranje.

Sam “inteligentni” brodski motor može se opisati kao obični moderni dizelski motor s karakterističnim konstrukcijskim svojstvima, gdje se velika pažnja posvetila konstruiranju sustava nadgledanja i upravljanja motora.

U praksi se “inteligentni” sustavi na glavnom motoru sastoje od različitih senzora koji očitavaju brojne podatke koji se računalno obrađuju. Ukoliko računalno utvrdi da je došlo do određenoga odstupanja, ono može dati izlazni signal koji se vodi na određeni mehanizam ili sklop, koji može ispraviti to odstupanje. Uz pomoć modernih aplikacija (softvera) računalno je moguće, na temelju ulaznih podataka iz senzora prilagoditi radne parametre motora radnim uvjetima, te također odrediti vrijeme nastupanja nekog kvara.

Vrlo je velika mogućnost prilagođavanja “inteligentnog motora” različitim režimima i uvjetima rada. Ovaj motor s elektroničnom kontrolom i sustavima nije ograničen osobinama pojedinih mehaničkih dijelova i sklopova, te je time omogućena vrlo velika fleksibilnost u radu pri različitim režimima i uvjetima rada. Tako je u stvari optimizacija radnih parametara motora određeni kompromis raznih kriterija koji su u radu postavljeni. Isto je tako moguće mijenjati te postavljene kriterije pod kojima stroj treba raditi, npr. štednja goriva, smanjena emisija ispušnih plinova, manevriranje, zaštita motora prilikom manjeg kvara itd., a koji ovise o različitim situacijama u kojima se nalazi brod ili glavni motor.

Iz navedenog slijedi da su glavne značajke inteligentnog motora :

- razvijeni sustavi automatskog upravljanja i regulacije,
- povećana pouzdanost pogona s manjim brojem posade,
- poboljšana efikasnost i sigurnost u radu motora,
- ugrađeni jednostavniji sklopovi i veće korištenje tzv. “inteligentnih” softvera,
- mogućnost planiranja parametara rada motora,
- sustavi nadgledanja stanja dijelova motora,
- mogućnost pristupa održavanju na temelju stanja motora,
- smanjeni troškovi održavanja,
- razvijeni komunikacijski sustavi,
- integriranost sustava optimalnog upravljanja sa kontrolnim sustavima motora,
- mogućnosti efikasnog i racionalnog upravljanja i korištenja rezervnih dijelova.

Time je omogućeno optimalno održavanje motora, ekonomsko iskorištavanje energije i efikasno upravljanje i korištenje rezervnih dijelova.

Korporacija Wärtsilä NSD u čijem je sastavu poznati proizvođač brodskih motora “Sulzer”, već duže vrijeme proizvodi sustave koji omogućuju efikasno upravljanje brodskim pogonom i energijom.

Jedan od vodećih svjetskih proizvođača motora "MAN B&W", pred 10 - 15 godina započeo je istraživanje pod nazivom "Intelligent Engine" (InEng), kojim je želio izraditi sustave koji bi činili "inteligentan motor", a već su neko vrijeme, neki od takvih sustava u proizvodnji i eksploataciji.

### **3.1.2. Djelovanje pojedinih sustava "inteligentnog motora" i utjecaj na ekonomičnost**

"Inteligentni motor" nudi mogućnosti u upravljanju brodskim pogonom koje do sada nisu bile moguće. S gledišta brodovlasnika, tijekom nabavke brodskih motora, čimbenici koji utječu na njegovu odluku su:

- troškovi i
- prilagodljivost motora različitim uvjetima rada.

Troškovi se općenito mogu podijeliti u dvije grupe na:

- početne troškove i
- pogonske troškove.

Početni troškovi nabavke "inteligentnog motora" su za sada nešto veći nego kod klasičnog motora. Razlog tome ne leži u činjenici korištenja elektroničke i mikroprocesorske tehnologije, već u daleko većem broju različitih senzora, servomehanizama, magnetskih ventila i raznih izvršnih članova, koji mogu znatno poskupiti motor.

Kod glavnog brodskog motora u pogonske troškove uključeni su:

- troškovi goriva
- troškovi maziva
- troškovi održavanja
- troškovi posade.

Troškovi goriva na InEng motoru mogu biti kontrolirani na više načina. Komponente u sustavu goriva koje su mikroprocesorski kontrolirane, bez mehaničkih veza s upravljačkim sustavom, omogućavaju optimalnu potrošnju goriva pri svim opterećenjima, bez mogućnosti da se određene komponente motora mehanički preoptereće. Režimi rada pri najmanjim brzinama vrtnje su računalno kontrolirani, a moguće je automatsko dinamičko isključivanje pojedinih cilindara iz rada, osiguravajući pri tome najpreciznije kontroliranje rada i potrošnje goriva. InEng se može automatski prilagoditi optimalnoj potrošnji goriva pri svim režimima rada i svim vrstama goriva.

Troškovi maziva su značajni, osobito troškovi ulja za podmazivanje cilindara. Sustav podmazivanja košuljica motora također je računalno vođen. Uz pomoć senzora, koji tijekom rada motora kontroliraju stanje prstenova i košuljica, točno se određuje količina ulja koja se treba ubrizgati u cilindar, te se time postiže optimalno podmazivanje i pri tome postiže najveća pouzdanost i trajnost vitalnih dijelova motora.

Troškovi održavanja određeni se pouzdanošću, trajnošću i opterećenjem pojedinih komponenti motora, te sposobnošću da se predvidi i utvrdi mjesto i vrijeme kvara. Stoga "inteligentni motor" ima sustave, koji neprekidno nadgledaju i kontroliraju određene parametre tijekom rada motora, čime se osim klasičnih upozorenja (prikazivanjem tih varijabli na monitoru računala i alarmiranje u kritičnom stanju) izvode radnje poput:

- *nadgledanje*; računalo na osnovu ulaznih varijabli uspoređuje trenutno stanje komponenti i čitavog motora s tzv. "zdravim" stanjem. Razlike između ta dva stanja će otkriti mjesto mogućeg kvara puno prije nego što kvar nastupi,;
- *dijagnosticiranje*; računalo na osnovi prije dobivene razlike i ostalih ulaznih podataka, daje dijagnozu, odnosno razlog zbog kojeg je došlo do odstupanja i vrijeme kada je potrebno obaviti popravak,;
- *predviđanje trenda*; za svaki parametar je moguće dobiti njegov trend, te uz podatke o prošlim i mogućim kvarovima, moguće je predvidjeti razvoj situacije za svaku komponentu motora, a time i cijelog motora,;
- *pogonski savjeti*; za takvu situaciju moguće je dobiti vrijeme nastupanja nekog kvara, a sustav može dati savjet kako treba postupati sa strojem, da se ne bi izazvali drugi ili veći kvarovi.

Opisanim sustavom dijagnoze, može se bitno smanjiti broj kvarova i vrijeme njihovog traženja, kao i vrijeme traženja faktora koji su ga izazvali. On-line interaktivnim priručnicima, moguće je smanjiti i vrijeme potrebno za održavanje i popravak eventualnih kvarova. Svi ovi sustavi daju bolju mogućnost planiranja popravaka i održavanja, čime se racionalnije troše rezervni dijelovi i vrijeme potrebno za otklanjanje kvarova, te time postiže bolja i učinkovitija organizacija rada na održavanju stroja.

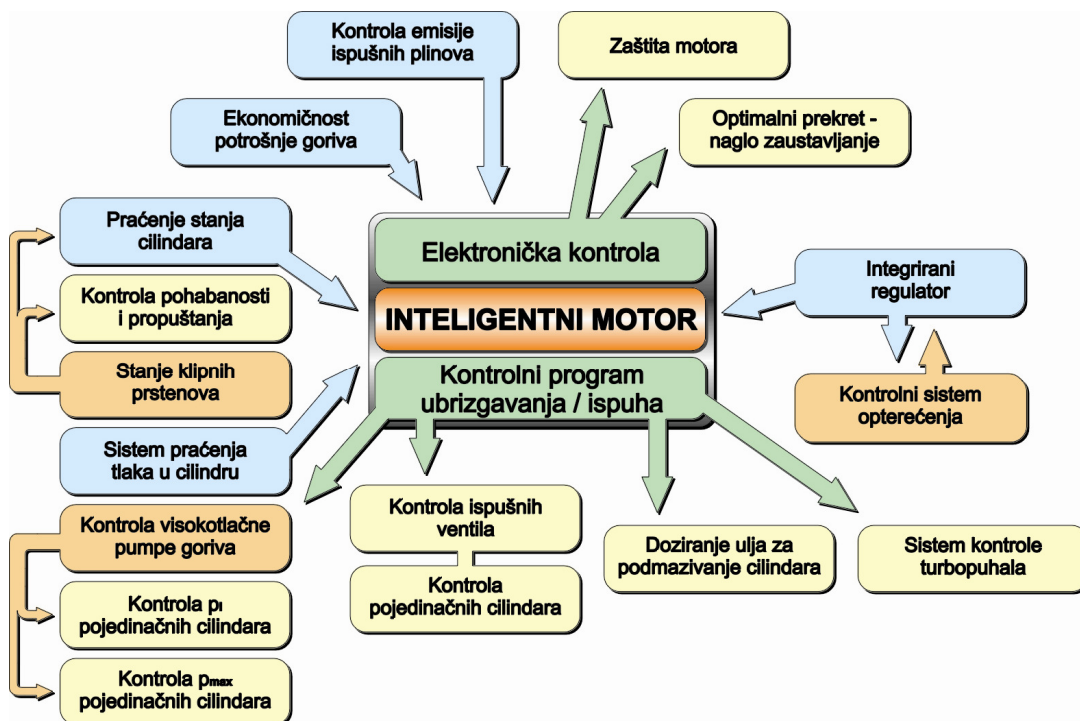
Troškovi posade, odnosno broj članova posade, može se također smanjiti uporabom navedenih sustava, omogućujući pritom bolju organizaciju posla, te mogućnost upravljanja pogonom osoblju koje nema velikog tehničkog iskustva ili znanja. Ovome najviše ide u prilog tvrdnja: "Ako prirodna inteligencija nije dostupna ili je preskupa, onda se uvijek može upotrijebiti umjetna".

### 3.2. Koncept i prednost "inteligentnog motora"

Inteligentni motor je istraživačko-razvojni koncept, koji nastoji dati odgovor na zahtjev za što pouzdanijim pogonskim motorima. Razvoj ide u pravcu buduće generacije stroja koji će biti pouzdan te istodobno prilagodljiv različitim načinima rada npr. optimiran s gledišta potroška goriva i kontrole emisije ispušnih plinova.

Da bi se postigla takva prilagodljivost treba omogućiti podešavanje ubrizgavanja goriva i sustava ispušnih ventila tijekom rada stroja. U tu se svrhu napušta konvencionalna bregasta osovina i prelazi na elektroničko upravljanje. Da bi se ostvarila pouzdanost, potrebno je imati sustav koji će djelotvorno zaštititi stroj od oštećenja uslijed preopterećivanja, izostajanja održavanja i lošeg podešavanja.

Upravljanje se može odabrati s upravljačkog mjesta na mostu ili pri samom stroju (kontrola emisije ispušnih plinova, zaštite motora, ekonomičnost u potrošnji goriva te optimalno preokretanje i naglo zaustavljanje), a elektronički upravljani sustav analizira opće stanje motora (praćenje stanja cilindara – pohabanost, propuštanje, stanje klipnih prstenova i tlakovi, kao i integrirani regulator za izjednačenje opterećenja na svim cilindrima), te upravlja sustavima ubrizgavanja goriva, ispušnim ventilima, cilindarskim maziv. uljem i sustavom turbonabijanja (Slika 24.).



Slika 24. Koncept "inteligentnog motora"

Elektronička kontrola ubrizgavanja goriva i rada ispušnih ventila donosi određene preinake u sustavima u kojima se koristi i brojne prednosti, koje se mogu podijeliti u tri glavne grupe:

1. Smanjenje potrošnje goriva:
  - karakteristike motora mogu biti optimizirane za različita opterećenja,
  - prilagođavanjem rada ispušnog ventila, max. tlak može biti konstantan u širem području opterećenja,
  - on-line praćenje cilindarskih procesa, omogućuje podjednako opterećenje među cilindrima.
2. Sigurnost i fleksibilnost u radu:
  - zaustavljanje i vožnja krmom poboljšani su zbog optimalnog ubrizgavanja i rada ispušnog ventila,
  - “lom motora” se može izbjeći smanjenjem zaustavnog puta broda,
  - brže ubrzanje broda zbog većeg tlaka ispirog zraka,
  - poboljšani rad na nižim brzinama vrtnje, koji su niži nego kod klasičnog motora, što je postignuto elektroničkom kontrolom ubrizgavanja,
  - elektroničko motrenje motora (bazirano na CoCoS-EDS<sup>14</sup> sustavu) koje identificira radno stanje i upućuje na probleme u njemu,
  - kontrolni sustav motora uključuje i sustav zaštite od preopterećenja, koji osigurava rad motora unutar optimalnih granica (posebno važno kod plitkih voda i “teškog brodskog vijka”),
  - niži troškovi i lakše održavanje zbog pravovremenog dijagnosticiranja stanja i kvara.
3. Fleksibilnost s obzirom na emisiju ispušnih plinova:
  - mogućnost zadovoljenja emisije *NOx* ispod propisanih granica IMO, tamo gdje “lokalni” zakoni to zahtijevaju, pomoću primarnih metoda, kao što je preinaka procesa izgaranja i recirkulacija ispušnih plinova, bez utjecaja na specifični potrošak goriva,
  - elektroničkom kontrolom motora prati se stanje emisije *NOx*, što vodi do jeftinije i brže recertifikacije (klase).

---

<sup>14</sup> CoCoS – EDS – Computer Controlled Surveillance – Engine Diagnostics Sistem



Znatnije smanjenje količine dušičnih oksida postiže se vodom, odnosno vlaženjem upuhivanog zraka. Metodom izravnog uštrcavanja vode ili uštrcavanja emulzije goriva i vode postiže se smanjenje  $NO_x$  za 50% i više, ovisno o omjeru vode i goriva. Metodom "Humid Air Motor" miješaju se vodena para i upuhivani zrak i pri tome mijenjaju termodinamička svojstva upuhivanog zraka, budući da se prelaskom u vodenu paru povećava specifična toplota nabijenog zraka, te smanjuje formiranje  $NO_x$ .

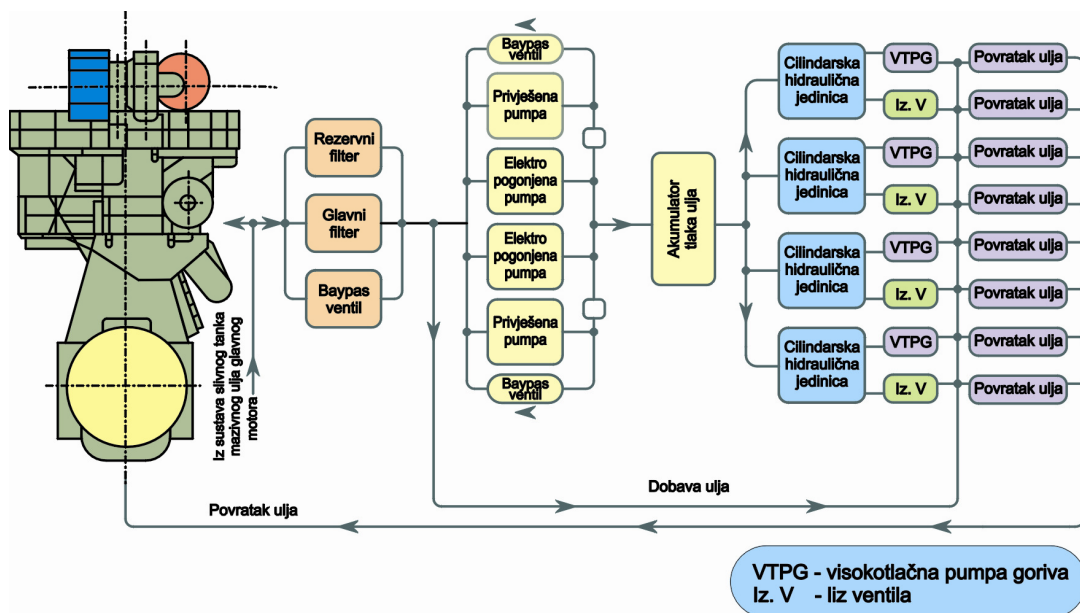
### 3.2.1. Osnovni sustavi "inteligentnog" motora

"Inteligentni motor" sastoji se od velikog broja različitih elektroničkih sustava, koji mogu biti međusobno integrirani. U tu svrhu na motoru su ugrađeni brojni hidraulički i električni izvršni članovi, koji zamjenjuju klasične mehaničke veze različitih dijelova upravljačkog sustava, te klasičnu razvodnu osovinu. Zbog toga je potrebno osigurati kvalitetan izvor hidrauličke energije, koji je u stanju pokretati sve hidrauličke izvršne članove potrebnom energijom (pogotovo sustave hidrauličkog otvaranja ispušnih ventila). Kod MAN B&W-ovog InEng motora, razvijen je sustav koji za hidrauličke sustave koristi ulje za podmazivanje glavnog motora i nema zaseban krug hidraulike, kao kod klasičnih motora s "običnom" automatizacijom.

Ulje se iz glavnog motora vodi preko samočistivog filtra (s mogućnošću pročišćavanja čestica veličine 6  $\mu m$ ) do sustava hidrauličkih pumpi, koji se sastoji iz razvodnog i kontrolnog sustava (Slika 25.).

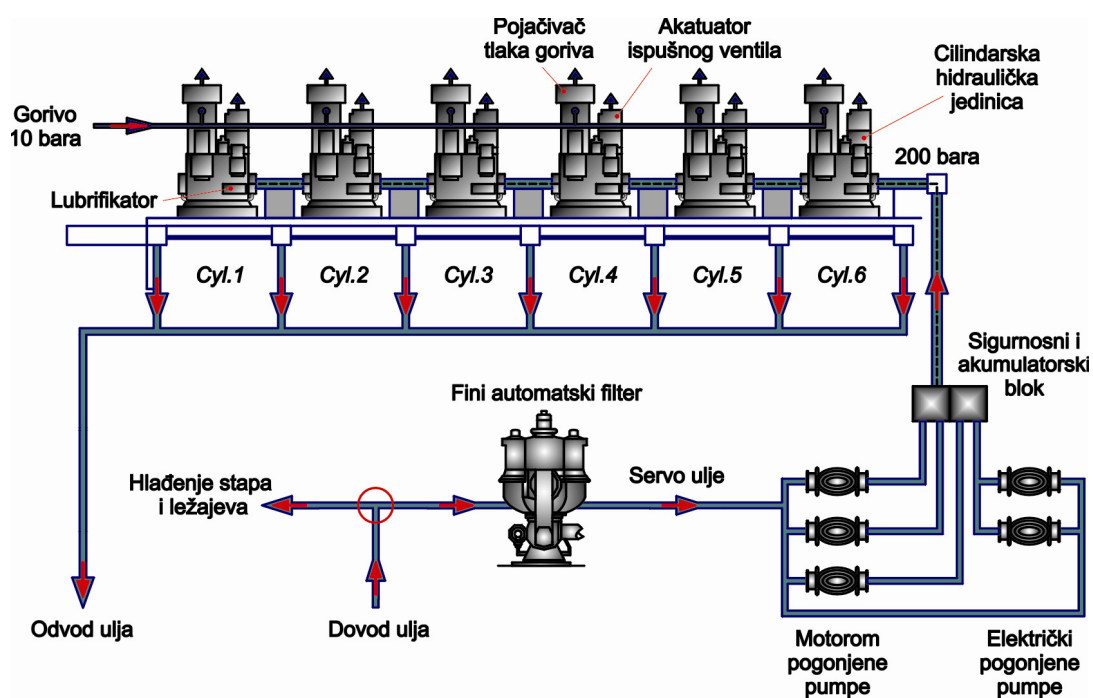
Razvodni sustav ima dvije ili više klipnih pumpi, koja su privješene na glavni motor, dok se kontrolni sustav sastoji od dvije volumetrijske pumpe, koje su pogonjene elektromotorom i spojene paralelno s razvodnim pumpama, omogućavajući pri tome uvijek točnu dobavu ulja za hidrauličke potrošače. Ulje se dalje vodi u akumulator i sigurnosni blok. Akumulator omogućuje točno određivanje parametara tlaka ulja potrebnog za potrošače. Ulje se dalje razvodi do potrošača (inteligentni rasprski, inteligentni sustavi za otvaranje ispušnog ventila), tj. do raznih servomehanizama.

Motorom pokretane višeklipne aksijalne pumpe dobavljaju visokotlačno ulje koje omogućuje ubrizgavanje goriva i rad ispušnog ventila, te se na taj način zamjenjuje klasična bregasta osovina (Slika 26.). Korištenjem ulja iz sustava motora kao radnog medija, izbjegavaju se zasebni tankovi, rashladnici, dobavne pumpe i cjevovodi. Prednost je priključenje na osnovni sustav ulja za podmazivanje motora s pretlakom od 3 do 5 bara.



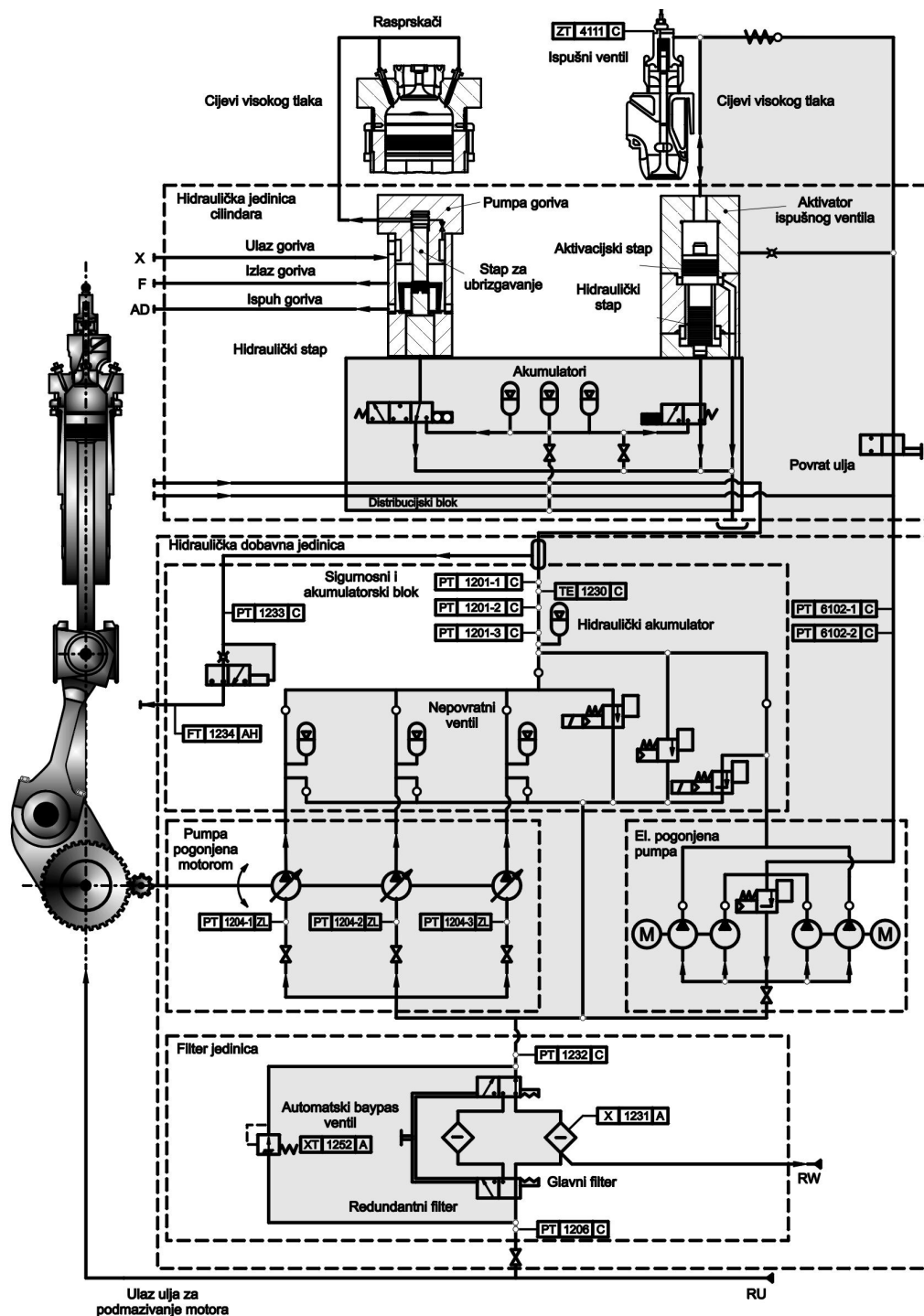
Slika 25. Sustav hidrauličnog ulja za upravljanje

Prije upućivanja motora, hidraulični se sustav stavlja pod tlak pomoću električno pokretane visokotlačne pumpe. Pri radu motora koriste se privješene pumpe pogonjene s motora, koje proizvode tlak od 200 bara.



Slika 26. Tok hidrauličnog ulja

Mehaničko hidraulički sustav (Slika 27), se sastoji od sustava visokog tlaka servisnog ulja hidraulike pogonjenog glavnim motorom, kojemu je svrha upravljanje hidraulički upravljanim ubrizgavanjem goriva, te jedinice regulacije otvaranja ispušnih ventila smještenih na svakome cilindru.



Slika 27. Shema mehaničko hidrauličkog sustava

Sustav startnog zraka i sustav podmazivanja cilindara su se također promijenili u odnosu na konvencionalni motor, budući da redundantni računalni sustavi kontroliraju sve te jedinice.

Analiza pumpe ulja privješene na porivni motor i dobiveni tlak od 200 bara, upućuje na mogućnost iskorištenja postignutog visokog tlaka ulja, za pokretanje neophodnih sustava porivnog stroja u slučaju nestanka struje na brodu, odnosno kvara dizelskog generatora.

Da bi se realnije sagledala spomenuta mogućnost, potrebno je usporediti izvedbe i principe rada novih motora proizvođača "MAN B&W" i "Warsila – Sulzer". Uočljivo je da oba proizvođača ugrađuju privješene pumpe ulja i postižu isti tlak od 200 bara.

### **3.2.2. Sustavi "inteligentnog" ubrizgavanja goriva i upravljanja ispušnim ventilima**

Jedan od najvažnijih čimbenika koji uvjetuju optimalnu potrošnju goriva su način i vrijeme ubrizgavanja goriva. MAN B&W je razvio sustav Intelligent Fuel Injection system (InFI), koji kontrolira način i vrijeme ubrizgavanja, te Intelligent Valve Actuator system (InVA), koji upravlja radom ispušnih ventila. Motor koji je opremljen inteligentnim sustavom kontrole ubrizgavanja goriva i inteligentnim sustavom otvaranja ispušnog ventila nema klasičnu razvodnu osovinu, već se ventil otvara hidraulički, a regulacija otvaranja se vrši elektronski. Oba sustava (InFI i InVA) sa svim potrebnim akumulatorima i brzodjelujućim hidrauličkim ventilima nalaze se u istom kućištu na motoru pojedinačno za svaki cilindar.

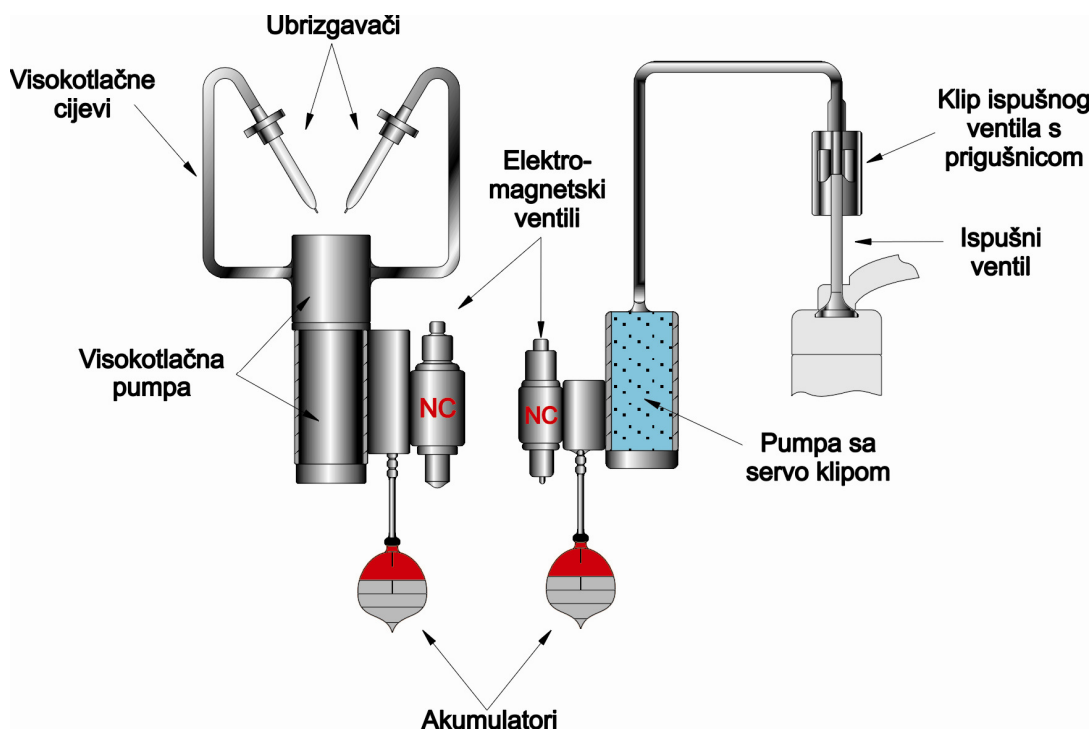
Za sustav servoulja koji pogoni pumpu ubrizgavanja, koristi se stlačeno, ohlađeno i čisto ulje za podmazivanje. Svaka jedinica cilindra opslužena je s akumulatorom servo ulja, da osigura efikasno brzu dostavu servo ulja, u skladu sa zahtjevima sustava ubrizgavanja, te da izbjegne visokotlačne oscilacije u sustavu cjevovoda servoulja.

Pomicanje stapa kontrolirano je pomoću proporcionalnog brzoaktivirajućeg kontrolnog ventila (tzv. NC<sup>15</sup> ventila). Zauzvrat je NC ventil kontroliran pomoću električnog linearnog motora koji dobiva ulazne kontrole s kontrolne jedinice cilindra.

Ovakav koncept (Slika 28.) izabran je iz razloga povećanja pouzdanosti i funkcionalnosti, budući da je sustav ubrizgavanja goriva srce motora i njegova je izvedba presudna za ekonomičnost potrošnje goriva, emisiju plinova i općenitu izvedbu motora.

---

<sup>15</sup> Razvijen od strane Curtiss Wright Drive Tehnology GmbH



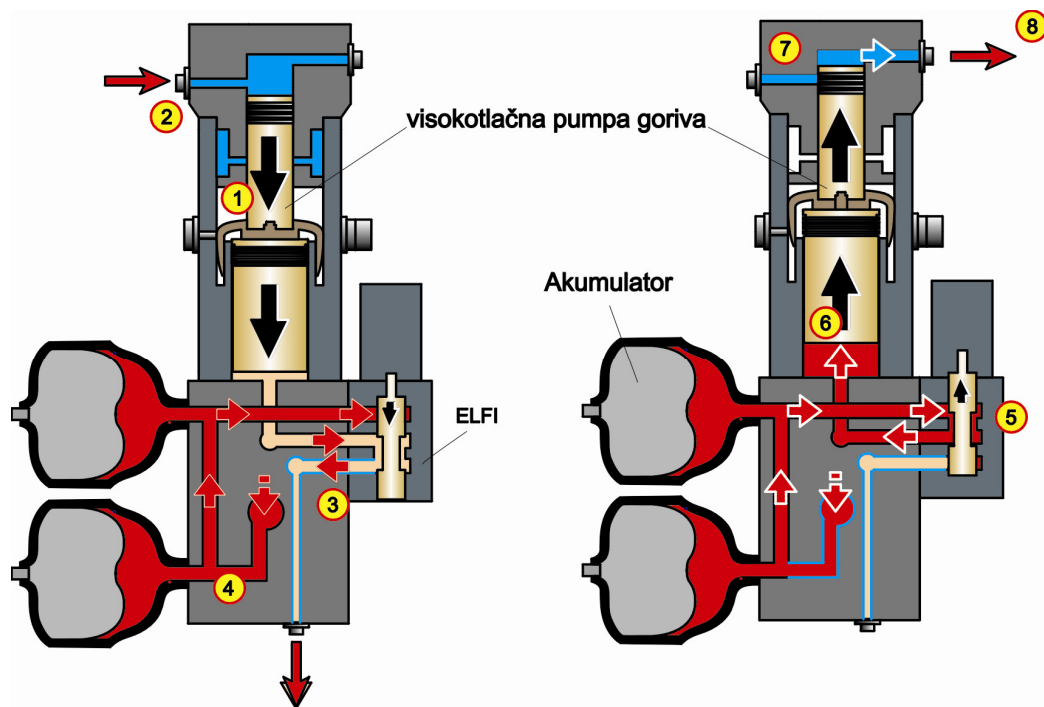
Slika 28. Hidraulički sustav ubrizgavanja goriva i upravljanja ispušnim ventilom

Pojačivač tlaka goriva, odnosno pumpa goriva (Slika 29.), objedinjuje ulaznu (lijeva skica) i izlaznu (desna) jedinicu goriva. Pomicanjem stapa prema dolje 1, otvara se ulaz gorivu u pumpu 2, a hidrauličko ulje izlazi kroz ELFI<sup>16</sup> ventil 3 i ujedno puni akumulator 4 pomoću hidrauličke dobavne jedinice. Stlačeno hidrauličko ulje je zadržano pomoću zatvorenog ELFI ventila. Aktiviranjem ELFI ventil prema gore 5, zatvara se povrat ulja i otvara protok stlačenom hidrauličkom ulju iz akumulatora. Pomicanjem upravljačkog stapa pod tlakom ulja prema gore 6, zatvara se dovod goriva 7. Porastom tlaka goriva oslobađa se put prema mlaznicama 8. Glavna osobina pumpi je mogućnost rada s teškim gorivom. Stap je izveden da onemogući miješanje teškog goriva s uljem, upravljački stap i stap za ubrizgavanje su jednostavni i nalaze se u kontaktu pomoću tlaka goriva koje djeluje na stap i tlaka ulja hidraulike koje djeluje na upravljački stap. Početak i kraj hoda stapa su kontrolirani pomoću brzoreagirajućeg hidrauličnog ventila (NC ventil), kontroliranog od strane računala.

Optimalno vrijeme ubrizgavanja kontrolirano pomoću hidraulike i elektronike je oko 18 do 20 stupnjeva hoda koljeničaste osovine pri punom opterećenju, a maksimalan stupanj paljenja je dostignut u drugoj polovici tog perioda. Da se dobije najbolja toplinska iskoristivost, gorivo koje se ubrizgava nakon

<sup>16</sup> Electronic Fuel Injection – elektronsko ubrizgavanje goriva

maksimalnog tlaka paljenja, mora biti ubrizgano (i zapaljeno) što je prije moguće, tako da se za taj dio topline koja se oslobađa, dostigne najviši stupanj ekspanzije.



Slika 29. Pumpa goriva

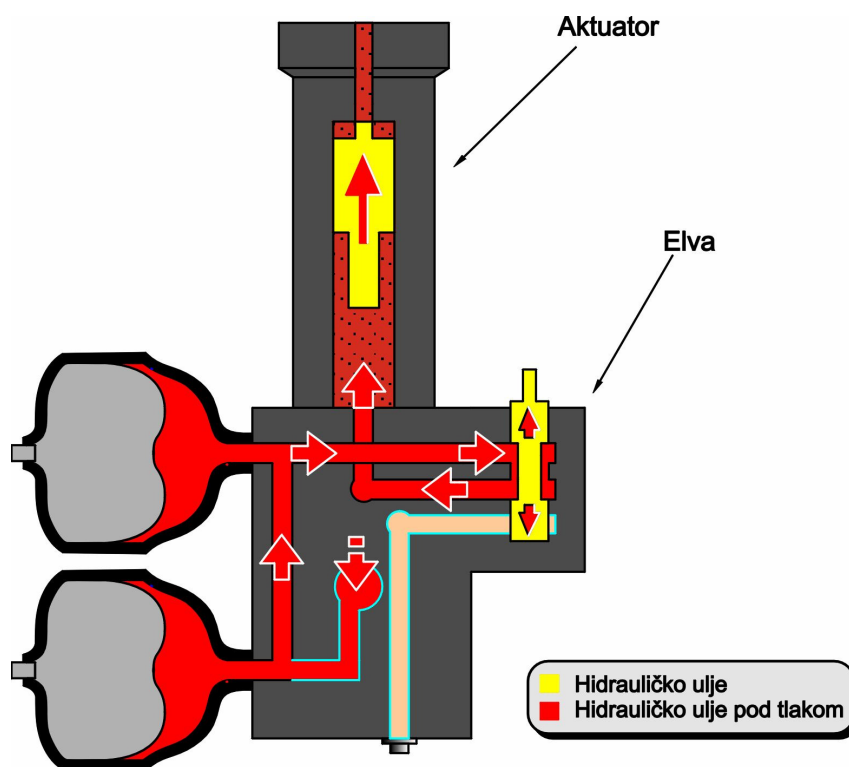
Idealno se oblikovanje ubrizgavanja postiže povećanim stupnjem ubrizgavanja pred sam kraj ubrizgavanja, tako da se preostalo gorivo dobavi što je brže moguće. Sustav inteligentnog motora se, kao i kod klasičnog, oblikuje prema navedenom s time da je njega moguće optimizirati za velik broj uvjeta opterećenja što kod klasičnog motora nije moguće.

Inteligentan motor može izvesti bilo koji oblik ubrizgavanja potreban za rad dizelskog motora. Sustav može raditi s velikim stupnjem slobode oblikovanja ubrizgavanja s gledišta određivanja vremena ubrizgavanja, trajanja, tlaka, te ostalog.

U praksi će određen broj uzoraka ubrizgavanja biti pohranjen u računalu i odabran od strane kontrolnog sustava, tako da će motor raditi optimalno od pokretanja do preopterećenja, kao i za vrijeme rada unatrag i naglog zaustavljanja.

Ispušni ventil upravljani je pomoću istog sustava servoulja kao i sustav ubrizgavanja goriva, koristeći stlačeno ohlađeno ulje kao radni medij. Kako se potrebna funkcionalnost ispušnog ventila svodi samo na određivanje vremena otvaranja i zatvaranja ventila, to se može postići koristeći jednostavan brzoreagirajući kontrolni ventil, odnosno aktuator ispuha koji ima dvije pozicije,

isključeno i uključeno. Kada je otvoren, hidrauličko ulje pomoću binarnog signala s kontrolnog sustava motora, podiže stap u adekvatnom vremenu (Slika 30.).



Slika 30. Aktiviranje ispušnih ventila

Kada se kod sustava aktivacije ispušnih ventila, ELVA<sup>17</sup> ventil kreće prema gore, otvara se ispušni ventil, dok ne završi potrebna ispušna faza, stalni tlak se održava sve dok ELVA ventil ne oslobodi put ulju i vrati ispušni ventil u svoju zatvorenu poziciju.

Pojedine komponente InVA sustava (aktivatori, tj. izvršni članovi) imaju gotovo isti princip rada kao i kod InFI sustava, samo što su zahtjevi u pogledu vremena i odziva djelovanja smanjeni u usporedbi s InFI sustavom. Pogonski mehanizam sustava sačinjava dvostupanjski aktivator, kojemu je na prvom stupnju postavljen prsten koji ima zadatak da prigušuje kretanje u oba smjera. Drugi stupanj treba postići tlak ulja koji će otvoriti ispušni ventil. Ovim sustavom se također može točno odrediti vrijeme i način otvaranja ispušnog ventila te time prilagoditi rad ventila režimu rada pod kojim radi motor, odnosno informacijama koje daje sustav upravljanja i kontrole glavnog motora.

Veliki iskorak u izgradnji suvremenih brodskih sporookretnih dvotaktnih dizelskih motora napravili su stručnjaci Wartsila-Sulzer razvojem RT-flex serije motora, koji nemaju bregastu osovinu. Nakon niza godina istraživanja i

<sup>17</sup> Electronic Valve activation – elektronsko aktiviranje ventila

usavršavanja različitih serija inteligentnih motora, u travnju 1995. godine dovršio se motor koji će u budućnosti predstavljati vrhunac tehnologije u brodstrojarstvu. Riječ je o trećoj seriji RTX-3 motora za tržište.

Motor je potpuno automatiziran, a elektronika prati i provjerava stanje motora, podešava ključne parametre za poboljšanje performansi motora, izvršava zadane režime rada, obavještava o mogućim kvarovima, te dijagnosticira veliki opseg kvarova. Motor koristi napredan MAPEX elektronički dijagnostički sustav (prijašnje verzije MAPEX sustava su u primjeni već nekoliko godina), koji je još uvijek na usavršavanju u istraživačkom centru Sulzera u Winterthuru.

Najveća novost koju taj motor donosi je zajednički sustav ubrizgavanja goriva (common rail injection system) bez korištenja bregaste osovine.

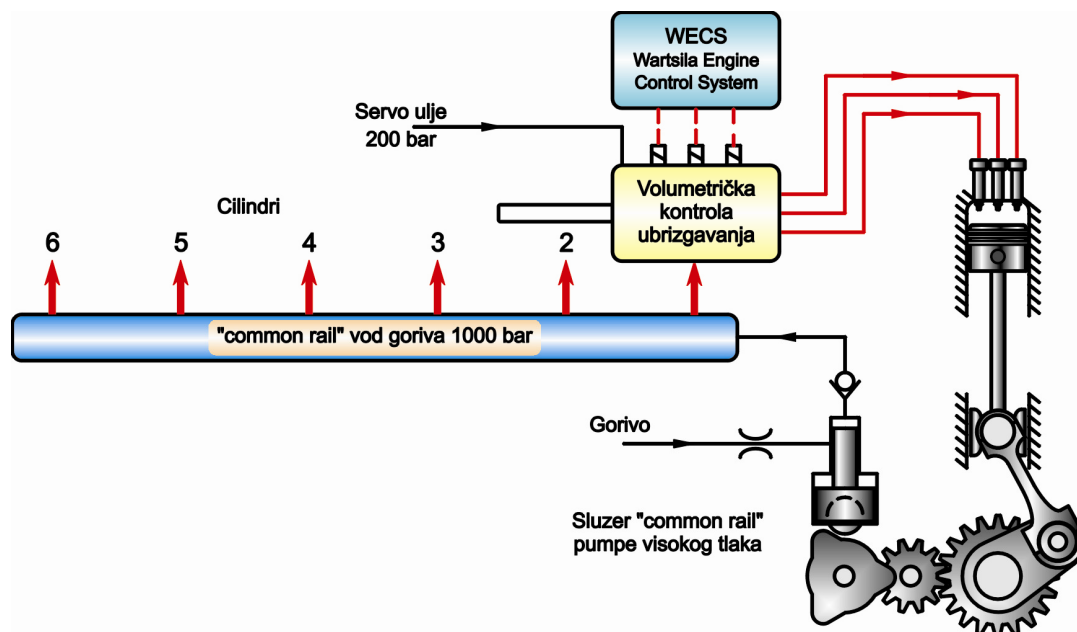
Ovakav sustav ubrizgavanja goriva omogućuje:

- kontrolu volumetrijske količine ubrizganog goriva
- vrijeme ubrizgavanja goriva
- mogućnost stupnjevanog ubrizgavanja goriva
- slobodan odabir tlaka ubrizgavanja
- veliki stupanj iskorištenja visokotlačne pumpe goriva
- redukciju štetnih spojeva u plinovima izgaranja
- smanjenje potrošnje goriva.

Dobavna jedinica goriva ima više visokotlačnih pumpi pogonjenih s nekoliko kvrgi na osovini, koja je pogonjena samim motorom (privješena pumpa). Pumpe usisavaju gorivo iz sustava goriva i tlače ga u cijev (zajednički vod) pod tlakom od oko 1000 bara. Gorivo se iz zajedničkog voda preko volumetrijskog kontrolora ubrizgavanja dovodi do rasprskaa goriva, a svaki cilindar ima svoju upravljačku jedinicu (Slika 31.).

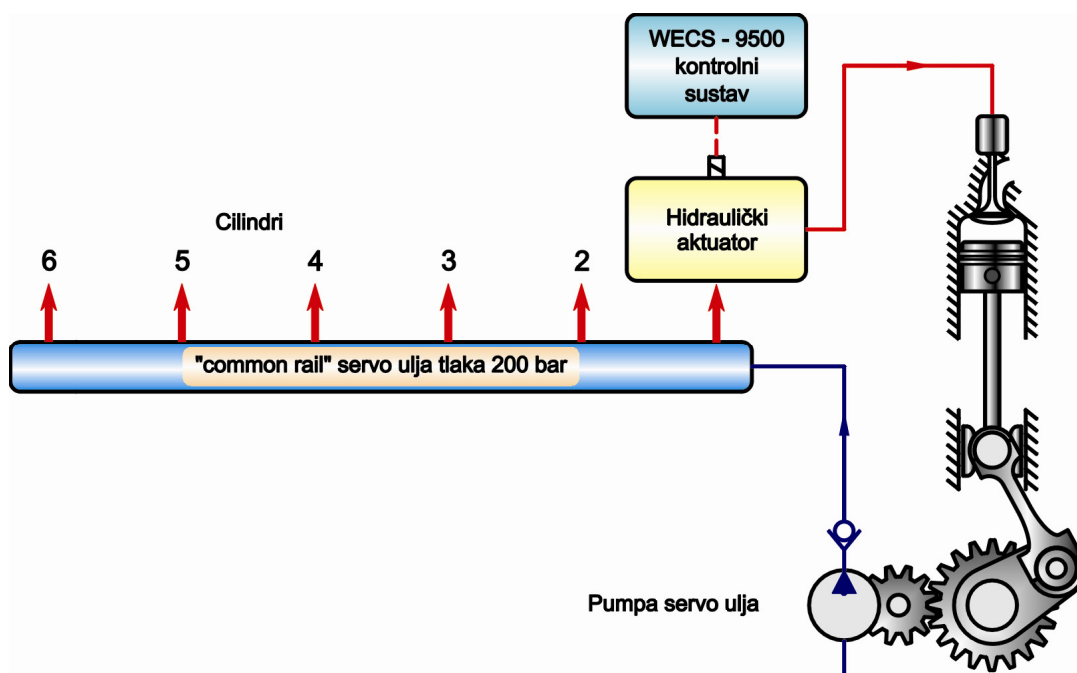
Kontrolna jedinica s brzo djelujućim ventilima, regulira moment ubrizgavanja goriva, kontrolira volumen ubrizganog goriva i oblikuje (profilira) samo ubrizgavanje. Tri rasprskaa na svakom cilindru su odvojeno kontrolirani, tako da mogu biti programirani tako da rade odvojeno ukoliko je to potrebno.





Slika 31. Sustav ubrizgavanja goriva na RT-flex motoru

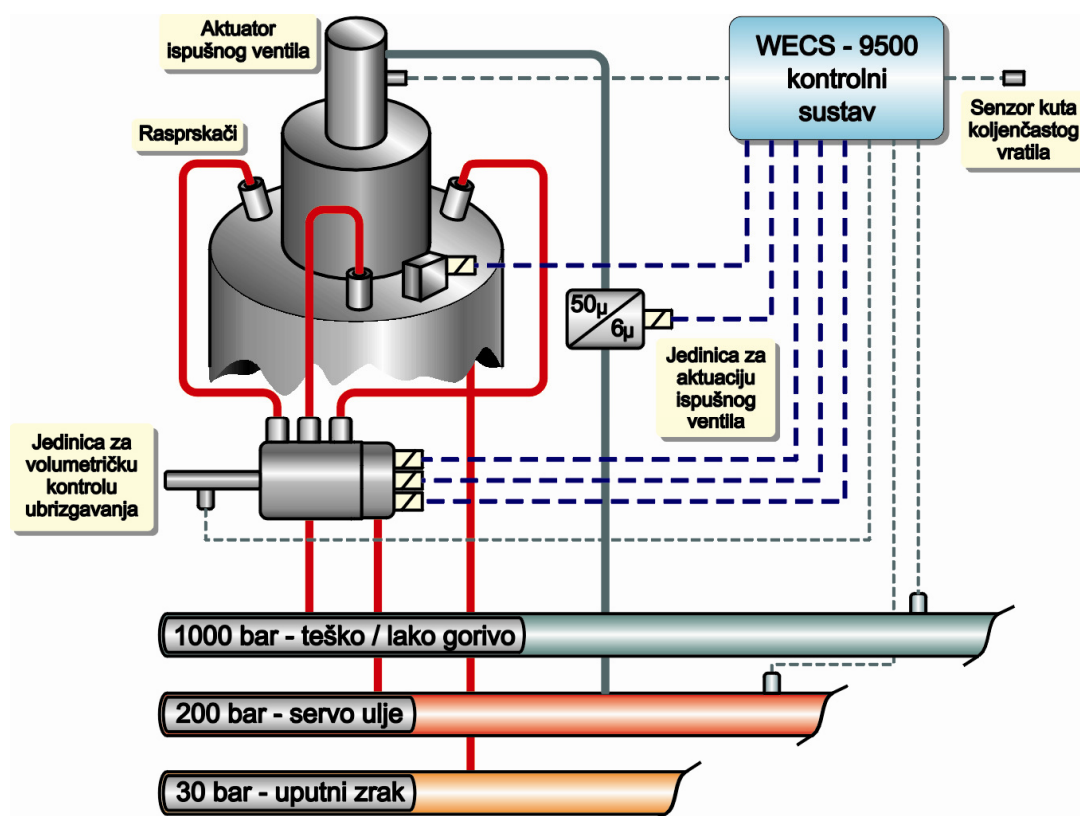
Servoulje dobavljaju hidraulične pumpe koje su ukomponirane u dobavnu jedinicu zajedno s dobavnim pumpama goriva, a u sustavu se koristi filtrirano ulje porivnog stroja koje pod tlakom od 200 bara dobavljaju navedene pumpe (Slika 32.).



Slika 32. Sustav servoulja na RT-flex motoru

Cjelokupni sustav "Common rail" (Slika 33.), koji se sastoji od sustava ubrizgavanja goriva i sustava servoulja za jedinicu kontrole ubrizgavanja goriva u motor, preuzima također i akciju ispušnih ventila s uljem tlaka 200 bara, te uputnog zraka motora.

Električno kontrolirana aktuacijska jedinica, koja se sastoji od istog brzodjelujućeg ventila, kao i kontrolirana jedinica ubrizgavanja goriva, za svaki cilindar omogućava potpunu fleksibilnost u određivanju momenta otvaranja i zatvaranja ventila goriva i ispušnih plinova.



Slika 33. "Common rail" sustav na RT-flex motoru

Sve funkcije RT- flex sustava kontrolirane su i nadzirane kroz integrirani, WECS-9500 elektronički modularni kontrolni sustav, s odvojenim mikroprocesorskim jedinicama za svaki cilindar sa sveukupnom kontrolom i nadzorom.

### 3.2.3. Samodijagnostički procesi u višeprocensnom sustavu

Ekonomičnost, pouzdanost i pristupačnost motora glavni su čimbenici koji uvjetuju način i intenzitet dijagnosticiranja. U posljednje vrijeme u pomorstvu postoji uočljiv trend smanjenja broja pogonskog osoblja, te sve veće primjene automatike i računalne tehnologije, a sve u svrhu smanjenja operativnih troškova. Na osnovi korištenja računalne tehnologije pristupilo se načinu održavanja pogona prema stanju, što može bitno smanjiti troškove održavanja.

Održavanje na brodovima se uglavnom temeljilo na tradicionalnom “empirijskom” načinu. Intenzitet i način održavanja bio je temeljen na tradicionalnoj praksi i alatima, a baziran na zahtjevima klasifikacijskih ustanova i proizvođača brodske opreme. U pomorskoj industriji danas postoji trend promjene samog načina i intenziteta održavanja koji prelazi s preventivnoga na održavanje prema stanju. Današnji softverski sustavi, koji koriste “umjetnu inteligenciju” su u mogućnosti na temelju ulaznih podataka predvidjeti mjesto i vrijeme nastajanja kvara, tako da uspoređuju izmjerene veličine s modeliranim krivuljama, omogućujući tako podlogu za najekonomičnije održavanje.

Kompanija MAN B&W počela je 1991. godine razvijati sustav pod imenom CoCoS (Computer Controlled Surveillance) s kojim se željelo stvoriti “inteligentni” sustav za upravljanje održavanjem i upravljanje rezervnim dijelovima.

Osnovna namjena CoCoS sustava je da omogućiti:

- povećanu sigurnost i pouzdanost brodskog motornog pogona
- osjetno smanjenje operativnih troškova gubitaka koji su nastali zbog kvara na glavnom stroju
- efikasno planiranje održavanja motora
- lako određivanje rezervnih dijelova
- integrirano upravljanje zalihom rezervnih dijelova i njihovim naručivanjem.

Sustav CoCoS sastoji se od brojnih senzora i/ili običnog PC-a, tj. osobnog računala i sofisticiranog softvera. Sam sustav objedinjava više podsustava koji mogu raditi neovisno, tj. moguće je da samo jedan od tih sustava bude instaliran na brod po želji brodovlasnika, ili da rade zajednički. Podsustavi koji se nalaze u CoCoS sustavu su:

- CoCoS-EDS (Engine Diagnostics System)
- CoCoS-MPS (Maintenance Planing System)
- CoCoS-SPO (Stock Handling and Spare Parts Ordering system)
- CoCoS-SPC (Spare Parts Catalogue).

CoCoS-EDS podsustav integrira u sebi funkcije prikupljanja podataka, nadgledanja, generiranja trenda i dijagnostike. Podsustav prikuplja podatke s preko 170 senzora, koji su postavljeni na motoru, obrađuje (određuje zavisnost između pojedinih parametara i stanja motora), te ih uspoređuje s modelima krivulja i granicama. Ovo omogućuje strojarima neprekidan uvid u trenutno stanje motora i njegovo “zdravlje”. Ukoliko sustav pronade određena odstupanja koje prelaze propisane granice, započinje proces dijagnoze, koji prikazuje razloge takvih odstupanja i korake koje treba poduzeti da se motor dovede u “zdravo” stanje.

CoCoS-MPS sustav ima administracijsku funkciju, odnosno:

- daje raspored pojedinih poslova na održavanju motora
- daje radne naloge
- daje instrukcije za obavljanje pojedinih poslova održavanja
- generira liste rezervnih dijelova i alata potrebnih za obavljanje pojedinih poslova
- ocjenjuje broj pogonskog osoblja i broj radnih sati potrebnih za obavljanje neke operacije.

Prema tome podsustav prezentira upravitelju stroja sve potrebne podatke za pomno planiranje operacija u procesu održavanja. Pokriva sve potrebe za preventivnim održavanjem, kao i potrebe za poslovima na uklanjanju posljedica i uzroka kvara koje su se eventualno dogodile. Također je moguće dobiti sve podatke koji su važni prije pristupa održavanja neke komponente, kao što su podaci o rezervnim dijelovima, radnim nalogima, instrukcije o prethodnim poslovima pripreme, povijest kvarova na tim komponentama itd. Osim toga moguće je od elektroničkih priručnika dobiti sve podatke o potrebnim prethodnim postupcima, video isječke ili pokrenuti vanjske programe koje mogu imati bilo kakve veze s održavanjem kojem se pristupa. Preostalim podsustavima CoCoS-SPO i CoCoS-SPC, moguće je dobiti pregled raspoloživih rezervnih dijelova i alata i točnu identifikaciju pojedinih dijelova otklanjajući mogućnost naručivanja pogrešnih dijelova. CoCoS-SPO sustav se brine o svim poslovima vezanim uz rezervne dijelove. Njegov glavni zadatak je da pomaže upravitelju stroja kod kontrole rezervnih dijelova, mjesta pohrane, minimalnoj zalihi, sigurnosnoj zalihi, dobavljačima, cijenama i statistici.

Projekt “inteligentnog motora” i sami sustavi inteligentnog motora tek su u začetima razvoja. Nesumnjivo je, da će se u budućnosti ulagati veliki naponi kako bi se usavršili i razvili novi sustavi koji će omogućiti najekonomičniji rad i najučinkovitije održavanje motora. Buduća rješenja moći će procesirati i obavljati naredbe poput: “Uputi motor“, “Dostigni konačnu brzinu od 13 čvorova“, “Oprezno vodi stroj u opasnim područjima navigacije“, “Uzmi u obzir da su prstenovi na cilindru br. 3 upravo zamijenjeni!” i sve to izvršiti pri najpovoljnijim radnim parametrima, dajući pri tome sve informacije o kvarovima koji će se

dogoditi i popravcima koji će morati biti izvršeni. Tada će se moći govoriti o inteligentnom motoru u pravom smislu te riječi.

U gradnji i projektiranju brodskih motora danas se teži trajnosti, sigurnosti i ekološkim zahtjevima (IMO i ISO). Na trajnost i sigurnost najviše utječu, pored novih konstrukcija (u manjoj mjeri), ugradnja novih materijala otpornih na visoke temperature. Ekološki zahtjevi, koji se odnose na ispušne plinove motora zahtijevaju puno kompleksniji pristup samom radu motora i projektiranje programa koji omogućuju utjecaj na pojedine elemente u radu motora.

Analiza strukture novonastalih dizelskih procesa, s glavnim ciljem ovog istraživanja, iznalaženjem redundantnih modela, dovodi do zaključka da nova tehnologija predviđa ugradnju elektroničko-hidraulično-mehaničkih sustava kontrole ubrizgavanja goriva u motor, otvaranja ispušnih ventila, kontrole otvaranja uputnog ventila, regulacije brzine vrtnje i podmazivanja cilindara. Dominantnu ulogu u kompletnom procesu imaju hidraulični sustavi u kojima se ulje za podmazivanje porivnog motora koristi kao radni medij, koji privještene pumpe porivnog motora tlače na tlakove od 200 bara i više. To upućuje na mogućnost ugradnje hidrogeneratora koji bi proizveo potrebnu električnu energiju, odnosno snagu za pokretanje neophodnih sustava za rad porivnog motora (Poglavlje 7.).

## **4. SIGURNOST POGONA PORIVNOG MOTORA S GLEDIŠTA OPSKRBE ELEKTRIČNOM ENERGIJOM**

Sigurnost pogona sporookretnog dvotaktnog porivnog dizelskog motora ovisna je o sigurnosti sustava opskrbe električnom energijom, budući da su gotovo svi podsustavi glavnog motora vezani za ispravan rad elektromotora.

Da bi povećali zalihost sustava porivnog motora potrebno je analizirati utjecaj električne energije na sustave i definirati mogućnost odziva sustava bez električne energije, a ukoliko to nije moguće, odrediti minimalnu potrebu električnu energiju za upućivanje i održavanje sustava.

### **4.1. Sustavi porivnog dvotaktnog dizelskog motora**

U brodskom strojnom kompleksu postoji više sustava, od kojih neki izravno ne utječu na rad porivnog stroja, dok bez drugih porivni stroj ne bi mogao djelovati ni u kraćem vremenu.

Brodске sustave možemo podijeliti na :

- Sustave glavnog porivnog stroja
  - glavni motor,
  - upravljanje motorom,
  - upućivanje motora,
  - daljinsko upravljanje i nadzor,
  - dijagnostika kvarova.
- Sustav glavnog motora
  - sustav podmazivanja motora,
  - sustav goriva,
  - sustav pročišćavanja dizelskog goriva,
  - sustav pročišćavanja teškog goriva,
  - sustav uporabe i skladištenja goriva,
  - sustav morske vode,
  - sustav slatke vode,
  - sustav zraka.

- Sustav pare:
  - kotlovski sustav i sustav pare na ispušne plinove,
  - sustav napojne vode,
  - sustav parnih turbina.
  
- Sustav hlađenja i klimatizacije :
  - hlađenje provijanta.
  - klimatizacija broda,
  - hlađenje skladišta tereta.
  
- Sustav kaljuže:
  - kaljuža skladišta,
  - kaljuža strojarnice.
  
- Sustav balasta:
  - balastiranje broda.
  
- Protupožarni sustav:
  - sustav gašenja požara morskom vodom,
  - ostali protupožarni sustavi.
  
- Sustavi obrade:
  - sustav evaporacije morske vode i tretiranje evaporirane vode,
  - sustav spaljivanja smeća i otpada,
  - obrada otpadnih i zauljenih voda,
  - sustav obrade fekalnih voda.
  
- Sustavi električne energije:
  - Generatori:
    - sustav pomoćnih motora,
    - sustav motora u nuždi,
    - sustav turbogeneratorsa,

- sustav osovinskog generatora,
- sustav povezanosti s kopnom.
- Električne sheme:
  - shema spajanja generatora,
  - opterećenje i rasterećenje generatora,
  - konfiguracija brodske mreže,
  - sustav djelovanja u sklopu konstantne frekvencije,
  - sustav djelovanja u sklopu varijabilne frekvencije,
  - sustav djelovanja u sklopu miješane frekvencije,
  - automatski nadzor opterećenja.
- Sustav automatskog upravljanja:
  - sustav upravljanja s komandnog mosta,
  - sustav upravljanja iz kontrolne kabine,
  - kontrolni sustav.
- Kormilarski sustav.
- Sustav tereta.

Za normalnu navigaciju i funkcioniranje broda neophodni su svi navedeni sustavi. Za upućivanje porivnog stroja potrebni su samo sustavi glavnog motora, koje je neophodno staviti u normalan rad, a budući da su bitni za istraživanje, potrebno ih je definirati.

Utjecaj sustava na rad porivnog stroja analizirat će se pomoću simulacije prestanka rada pojedinih sustava, koji će nastupati gubitkom pogona pumpi koje omogućuju normalan rad sustava. Simulacija će biti izvedena na strojarskom simulatoru "Kongsberg Norcontrol PT 2000" na "Fakulteti za pomorstvo in promet, Univerze v Ljubljani", u Portorožu. Simulator je opskrbljen svim sustavima broskog pogona glavnog porivnog stroja, dvotaktnog sporookretnog dizelskog motora. Motor je "MAN B&W" ugrađen na super tanker klase VLCC nosivosti 200.000 tona, ima 5 cilindara, promjera stapa 900 mm, s brzinom vrtnje  $74 \text{ min}^{-1}$ , maksimalnim hodom od 2,9 m, srednjim tlakom 18.2 bar, snage 20.000 kW.

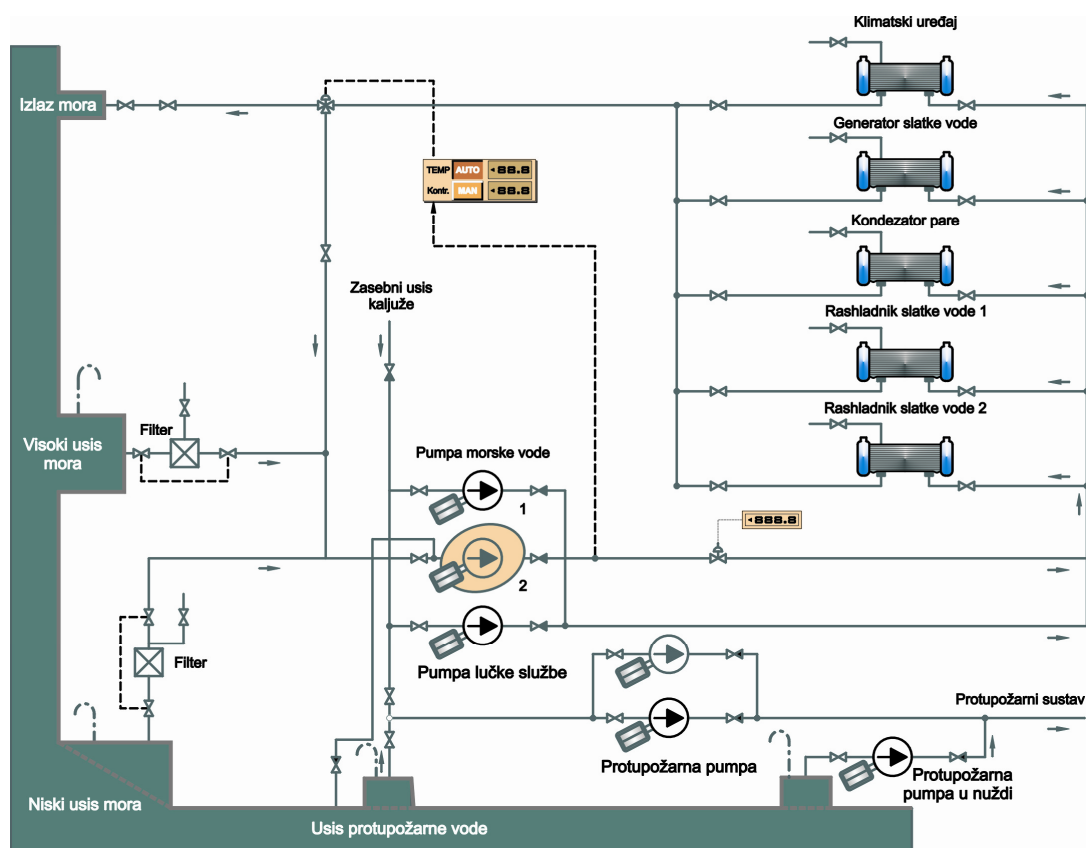


## 4.2. Sustav morske vode

Morska voda se na brodu koristi u pogonskom kompleksu kao rashladno sredstvo, za proizvodnju slatke vode, za sustave protupožarne zaštite, balasta i za pranje. Svi potrošači morske vode na brodu povezani su s usisnim kolektorom mora.

Brodski rashladni sustav može se izvesti na više načina, a svaki od njih ima određene prednosti i nedostatke. Odvođenje topline morskom vodom može biti izravno (direktno) ili neizravno (indirektno).

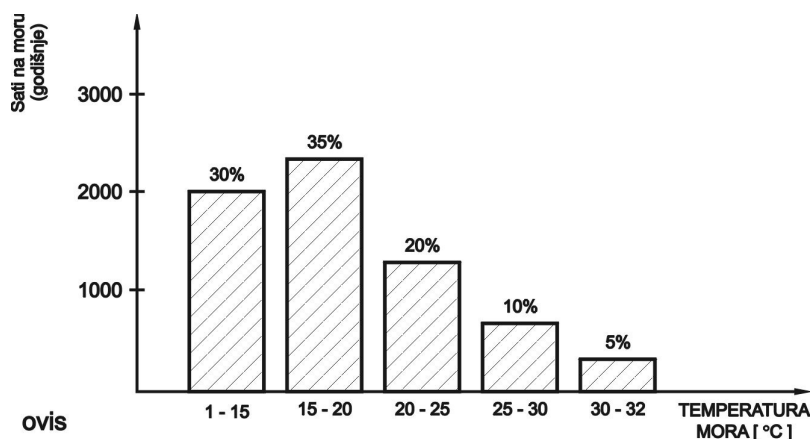
Danas se najčešće koristi indirektno hlađenje, pomoću centralnog rashladnog sustava, koji osigurava minimalnu potrošnju energije [ 34 ]. Ovakav sustav povećava troškove izgradnje broda, ali smanjuje troškove u eksploataciji. Sustav se sastoji od kruga morske vode i dva kruga slatke vode (Slika 34.).



Slika 34. Centralni rashladni sustav

Sustav morske vode povezan je pumpama morske vode koje crpe vodu iz usisa mora preko filtra i tlače je kroz centralni rashladni uređaj i dalje u more.

Ugradnjom tropskog ventila na tlačnoj strani, prije izlaza rashladne vode u more, omogućava se miješanje i recirkulacija usisne i izlazne morske vode, što osigurava temperaturu usisa od 15° do 32 °C, kako to zahtijevaju registri. Na energetske bilancu ovoga sustava prvenstveno utječe temperatura morske vode, a ona ovisi o godišnjem dobu i geografskim područjima u kojima brod plovi. Dugogodišnjim istraživanjima na vrlo reprezentativnom broju brodova u eksploataciji, došlo se do podataka o prosječnoj plovidbi broda u određenim temperaturnim zonama mora (Slika 35.), što ukazuje na činjenicu da bi s gledišta energetske bilance broda bilo optimalno ugraditi tri pumpe morske vode, od kojih jedna pumpa mora raditi tijekom navigacije i kada je brod u luci, druga pumpa se ukopčava tijekom navigacije u ovisnosti o temperaturi mora a treća pumpa je pričuvna. U nuždi pričuvna pumpa može poslužiti kao protupožarna, balastna ili kaljužna pumpa. Da bi se odredila energija pumpe mora, potrebno je definirati minimalne i maksimalne količine protoka morske vode kroz centralni rashladni sustav.



Slika 35. Prosječna plovidba broda u određenim temperaturnim zonama mora

Analizom centralnih rashladnih sustava porivnih dvotaktnih sporookretnih dizelskih motora kompanija MAN, B&W, ABB, MITSUBISHI, dolazi se do minimalnih količina protoka morske vode od 100 t/h i maksimalnih protočnih količina od 1000 t/h [ 34 i 77 ].

Na osnovi definiranih količina protoka kroz centralni rashladni sustav, može se odrediti potrebna snaga pumpe:

$$P = \frac{Q \cdot \rho \cdot e}{\eta} \quad [\text{W}]$$

uz:

$$e = g \cdot H \quad [\text{J/kg}]$$

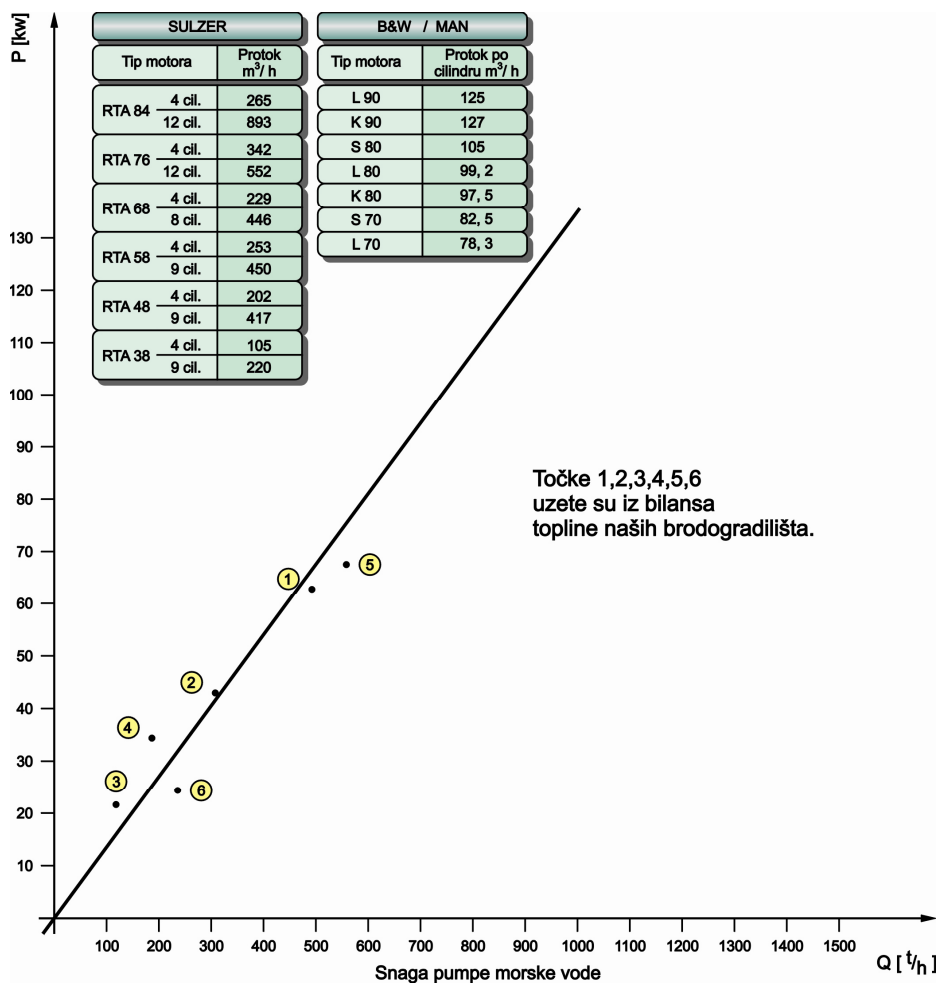
slijedi:

$$P = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot H}{1000 \cdot \eta} \quad [\text{kW}],$$

gdje je :

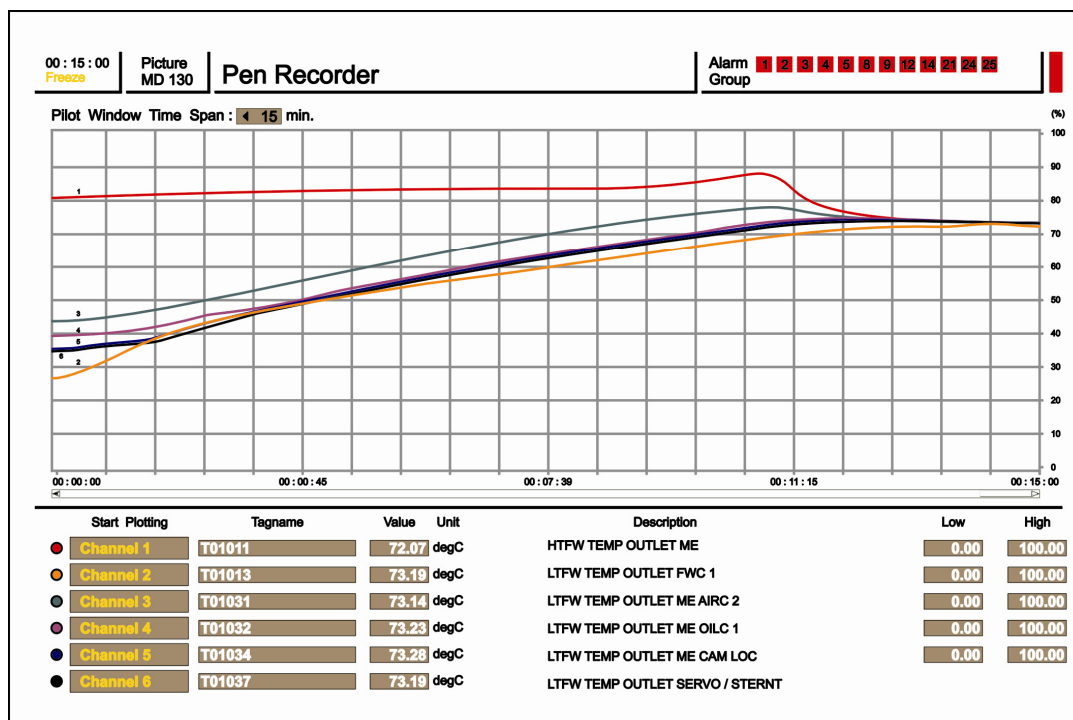
|        |                                       |                         |
|--------|---------------------------------------|-------------------------|
| $g$    | - gravitacija,                        | $[\text{m/s}^2]$        |
| $\rho$ | - gustoća tekućine,                   | $[\text{kg/m}^3]$       |
| $Q$    | - volumenski protok,                  | $[\text{m}^3/\text{s}]$ |
| $H$    | - ukupna dobavna visina,              | $[\text{m}]$            |
| $e$    | - stvarna specifična energija dobave, | $[\text{J/kg}]$         |
| $P$    | - potreban snaga pumpe,               | $[\text{kW}]$           |

Koristeći veličine protoka morske vode kroz centralni rashladni sustav iz kataloga proizvođača motora i bilanci topline za novogradnje brodogradilišta "3 maj" u Rijeci i "Uljanik" u Puli, definiran je model za odabir pumpe morske vode (Slika 36.).



Slika 36. Određivanje pumpe morske vode

Da bi se prikazao utjecaj morske vode na djelovanje porivnog motora, simulirani su parametri protoka morske vode na modelu broda na simulatoru (Slika 37.). Kako simulacijski model ima turbogenerator, prestanak rada pumpe morske vode izazvat će alarm niskog tlaka na ejektorskoj pumpi generatora slatke vode i alarm povećane temperature u vakumskom kondenzatoru pare. Ukoliko je u pogonu samo turbogenerator, dizelski generator ne starta u određenom vremenu, pa dolazi do prestanka rada porivnog motora.



Slika 37. Rezultati simulacije prestanka rada pumpe morske vode

Prestankom protoka morske vode dolazi do deformacije parametara generatora slatke vode, no to nema trenutačni utjecaja na poriv motora. Dvije minute nakon prestanka rada pumpe morske vode, pojavljuje se alarm na niskotemperaturnoj strani slatke vode centralnog rashladnog sustava, nakon pet minuta pojavljuje se alarm visoke temperature ispirnog zraka GM, potom alarm rashlade stapova motora, te nakon šest minuta javlja se alarm ležajeva motora i križne glave. Prestankom protoka morske vode povećava se temperatura i tlak rashlade vode porivnog motora, da bi se u nepunih jedanaest minuta pojavio pad brzine vrtnje porivnog motora (SLOW DOWN) s alarmom i to zbog povećanja temperature ispirnog zraka i temperature ulja. Automatskim smanjenjem brzine vrtnje smanjuje se i snaga poriva, a u međuvremenu se pojavljuje alarm temeljnih ležajeva. Tijekom simulacije, a nakon četrnaest minuta pojavljuje se alarm visoke temperature ulja ležajeva motora, što automatski djeluje na prestanak rada motora (SHUT DOWN).

Iz simulacije je vidljiv utjecaj sustava morske vode na poriv broda. Također se može uočiti, da sustav morske vode nema najveći prioritet, budući da od prekida rada pumpe mora do alarma smanjenja brzine vrtnje i smanjenja snage motora protječe vrijeme od jedanaest minuta, a do potpunog prestanka rada motora potrebno je 14 minuta. Na simulaciji se uočavaju vremenski protoci nestanka morske vode i promjene temperature visokotemperaturne rashladne slatke vode (na ulazu ili na izlazu iz motora u ovisnosti o mjestu mjerenja), niskotemperaturne rashladne slatke vode na izlazu iz rashladnika vode, na izlazu iz rashladnika ispirnog zraka, te na izlazu iz rashladnika ulja glavnog motora.

### 4.3. Sustav slatke vode

Cilj hlađenja motora je održavanje optimalnog toplinskog režima rada motora u svim uvjetima, čime se znatno doprinosi povećanju učinkovitosti i ekonomičnosti motora, smanjenu toplinskog opterećenja, povećanju otpornosti na kvarove, odnosno sigurnost i trajnost vitalnih komponenti motora.

Temperatura rashladne vode je jedan od parametara koji dominantno određuje toplinski režim rada motora i sustava podmazivanja. Za održavanje stabilne srednje temperature rashladne vode motora, najpovoljnija je regulacija, odnosno stabilizacija u zadanim granicama, temperature rashladne vode na izlazu iz motora.

Rashladni sustav sačinjavaju dva međusobno povezana i ovisna podsustava:

- podsustav morske vode (otvoreni krug)
- podsustav slatke vode (zatvoreni krug).

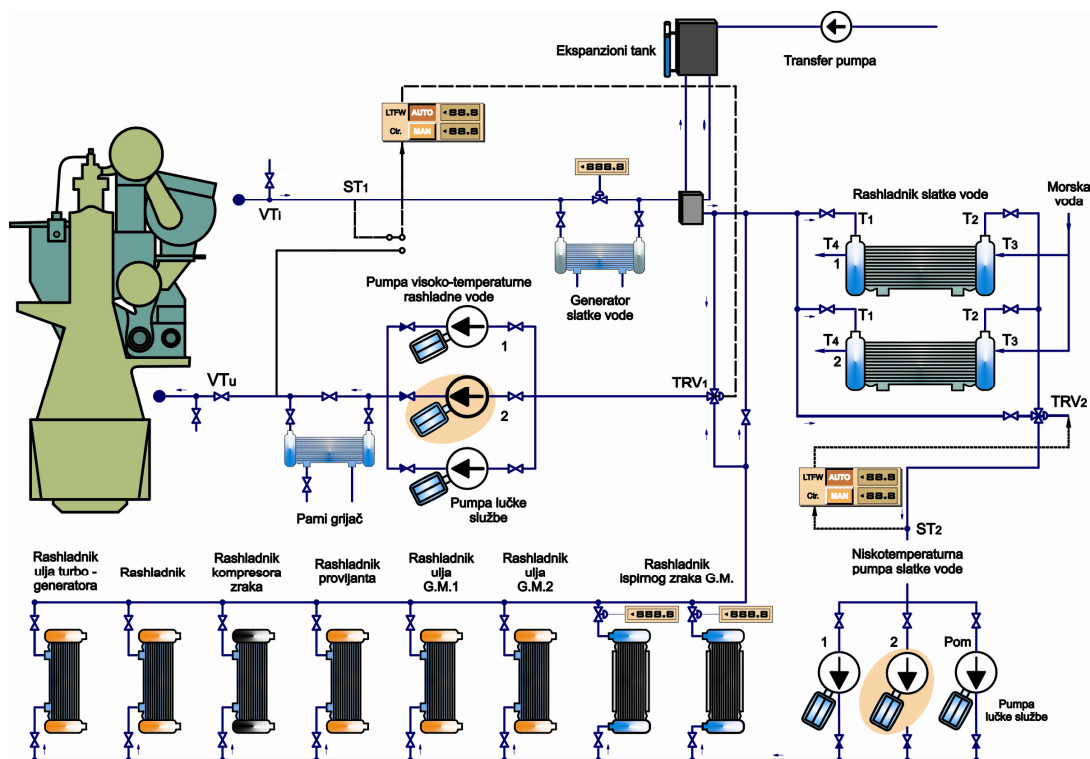
Rashladni sustav slatke vode sastoji se iz:

- niskotemperaturnog rashladnog sustav slatke vode NTSV i
- visokotemperaturnog rashladnog sustava slatke vode VTSV.

Krugovi slatke vode međusobno su povezani krugom morske vode preko izmjenjivača topline na različite načine, uvijek vodeći računa o ekonomskom aspektu tijekom gradnje i eksploatacije broda.

Sustav niske temperature spojen je s centralnim rashladnikom i preko pumpi slatke vode ulazi u paralelno spojene potrošače (Slika 38.). Minimalna temperatura NT vode je većinom 36°C, regulaciju protoka u izmjenjivačima topline obavlja ventil konstantnog tlaka, a izlazna temperatura vode iz potrošača niske temperature kreće se do 50°C. Sustav visoke temperature ostvaruje ciklus

slatke vode pomoću pumpe koja tlači vodu u cilindre porivnog dizelskog motora. Na izlazu iz motora voda odlazi u generator slatke vode. Izlazom iz evaporatora voda se djelomično vraća na troputni regulacijski ventil upravljani PID regulatorom, koji miješa toplu vodu iz glavnog motora s relativno hladnom vodom iz kruga niske temperature. Regulator može kontrolirati temperaturu vode prije ulaza u motor ili izlaza iz motora. Zagrijavanje glavnog motora prije upućivanja omogućeno je pomoću parnoga zagrijača. Oba kruga imaju po tri cirkulacijske pumpe, od kojih je jedna u pogonu, a druga u pričuvi kada radi glavni motor. Treća pumpa služi za zagrijavanje porivnog motora kada nije u pogonu, a može poslužiti i kao pričuvena pumpa.



Slika 38. Rashladni sustav slatke vode

Tlak niskotemperaturnog sustava mora biti veći od tlaka pumpe morske vode, da se morska voda ne bi miješala sa slatkom vodom. Povećanje temperature rashladne vode u motoru kreće se do  $8^{\circ}\text{C}$ .

Za daljnju analizu potrebno je definirati snagu pumpi VT i NT vode za upućivanje glavnog motora, pa je na isti način kao za sustav morske vode i podataka proizvođača porivnih motora [20, 21], te bilance topline brodogradilišta, definiran model (Slika 39.)

Kako je optimalna temperatura slatke vode na ulazu u motor  $70^{\circ}\text{C}$ , a na izlazu se može kretati i do  $90^{\circ}\text{C}$ , potrebno je u sustav ugraditi automatski nadzor

i regulaciju zadanih parametara. Preraspodjelu protoka rashladne vode u zatvorenom krugu motora obavlja termoregulacijski ventil ( $TRV_1$ ), u ovisnosti o vrijednosti temperature vode na izlazu iz motora, koju daje senzor temperature  $ST_1$ . Izmjena topline između motora i rashladne vode može se definirati izrazom:

$$c_{h1} \frac{dT_{VI}}{dT} = Q_{1dov} - Q_{1odv}$$

$$Q_{1dov} = f(T_{pk}, T_{VI}, T_{VU})$$

$$Q_{1odv} = f(q, T_1, T_2),$$

gdje je:

- $c_{h1}$  - toplinski kapacitet izmjenjivača "motor – rashladna voda",
- $Q_{1dov}$  i  $Q_{1odv}$  - količina dovedene i odvedene topline motora,
- $T_{pl}$  - temperatura plinova izgaranja,
- $T_{VI}$  i  $T_{VU}$  - temperatura rashladne vode na izlazu i ulazu motora,
- $T_1$  i  $T_2$  - temperatura rashladne vode na ulazu i izlazu rashladnika,
- $q_1$  - protok rashladne vode kroz rashladnik određen položajem termoregulacijskog ventila ( $TRV_2$ ).

Proces izmjene topline rashladne (slatke) vode i morske vode može se opisati:

$$c_{h2} \frac{dT_4}{dt} = q_{2dov} - Q_{2odv}$$

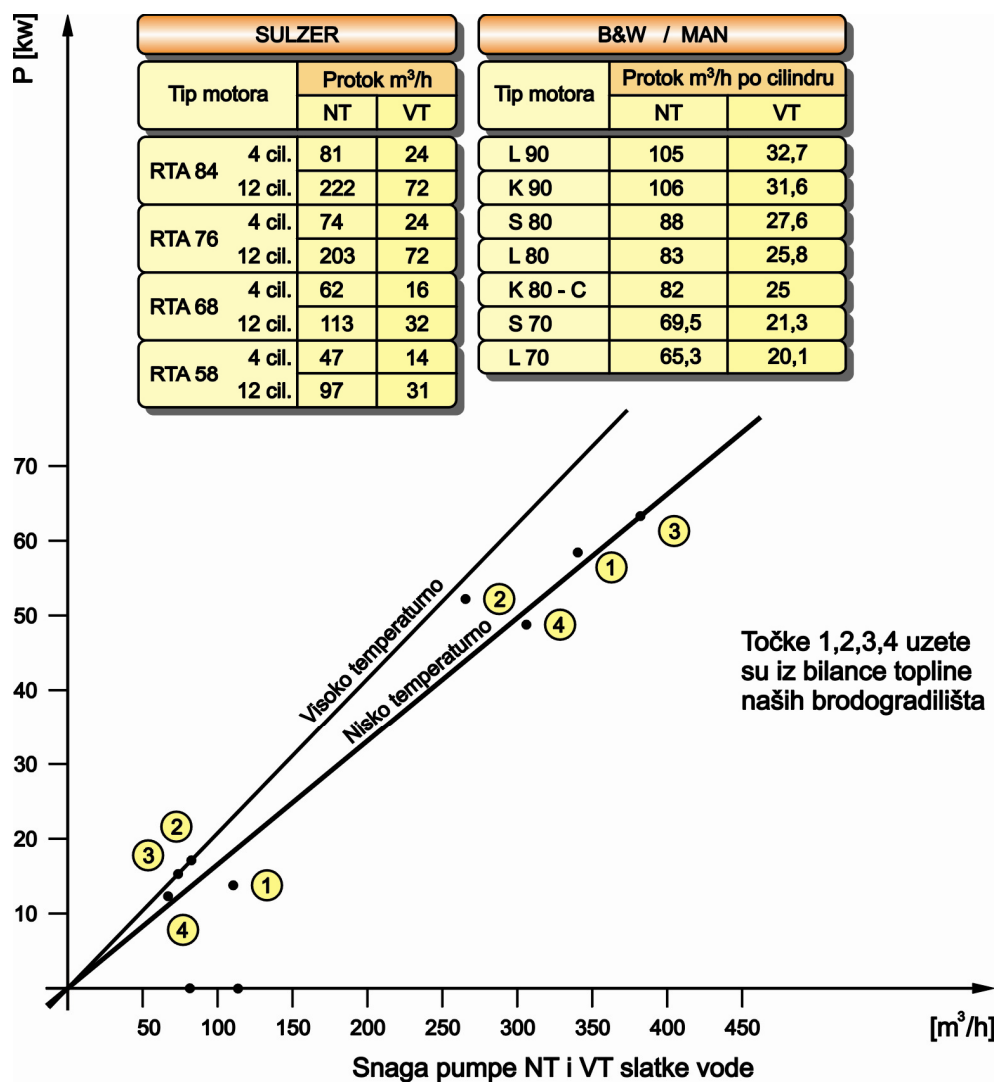
$$Q_{2dov} = f(T_1, T_2, T_3, T_4)$$

$$Q_{2odv} = f(T_3, T_4),$$

gdje je:

- $C_{h2}$  – toplinski kapacitet izmjenjivača "slatka voda – morska voda",
- $Q_{2dov}$  i  $Q_{2odv}$  – količina dovedene i odvedene topline,
- $T_3, T_4$  – temperatura morske vode na ulazu i izlazu iz izmjenjivača.

Zbog pojednostavljenja modela rashladnog sustava dizelskog motora može se pretpostaviti jednakost temperature rashladne vode na izlazu iz motora i ulaza u rashladnik ( $T_{VI} = T_I$ ) i temperatura na izlazu iz rashladnika i ulaza u motor ( $T_2 = T_{VU}$ ), a temperatura mora na ulazu u izmjenjivač smatrati nepromjenljivom ( $T_3 = \text{konst.}$ ).



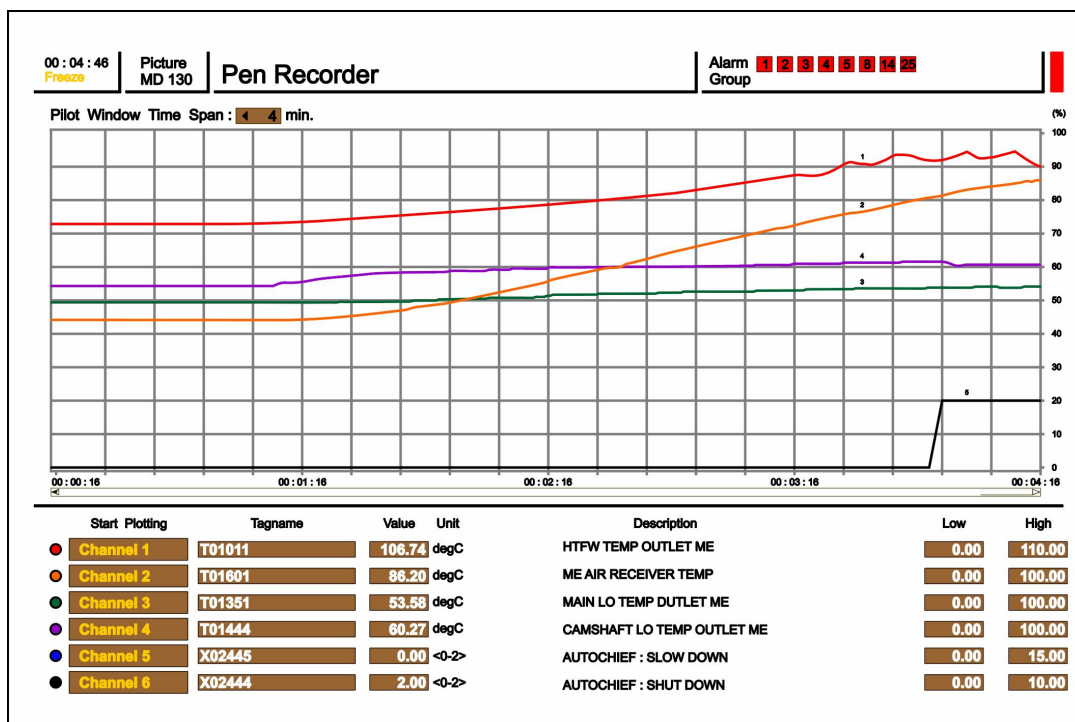
Slika 39. Određivanje pumpi slatke NT i VT vode

Najčešći kvarovi sustava slatke vode su kvarovi osnovnih komponenti sustava, odnosno pumpi i elektromotora morske i slatke vode, ventila, cjevovoda, rashladnika i filtra vode. Najveći problem sustava je nestanak električne energije, koji djeluje na zaustavljanje porivnog motora.



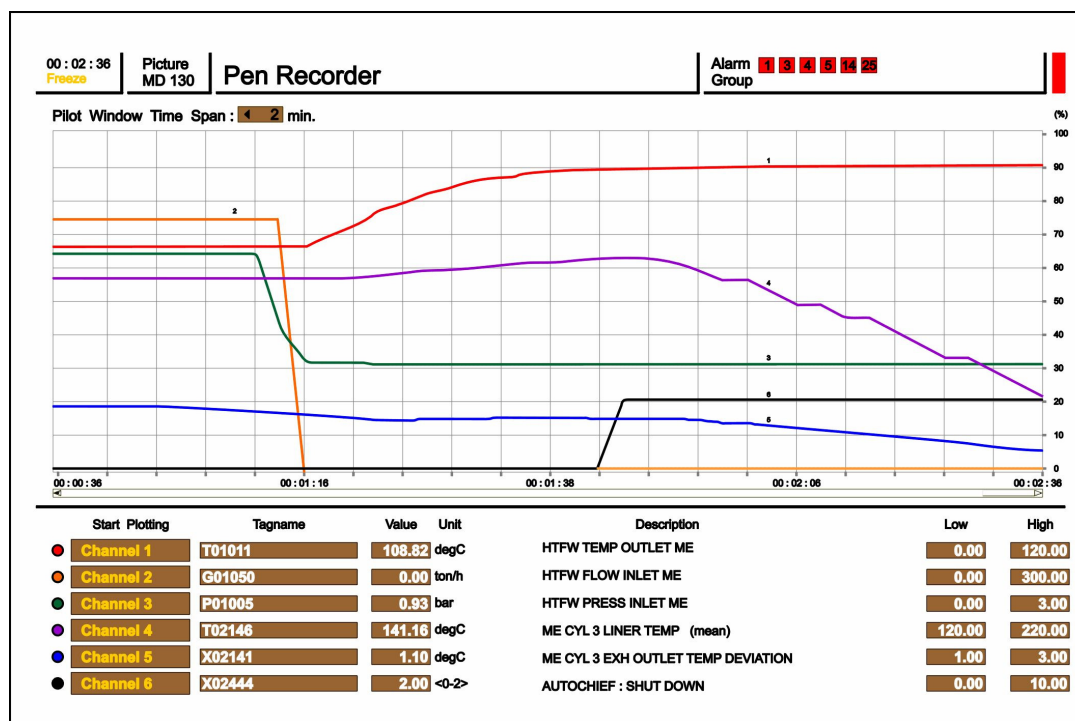
Budući da postoje dva protoka slatke vode s različitim temperaturama, neophodno je napraviti simulaciju oba protoka. Postupak simulacije (Slika 40.) sličan je prethodnom, odnosno simulira se prestanak rada niskotemperaturne pumpe slatke vode, što izaziva alarm ispirnog zraka GM, promjena tlaka visokotemperaturne pumpe dovodi do alarma cilindra, a nakon dvije minute dolazi do alarma temperature vode za hlađenje GM. Ova promjena izaziva poremećaj generatora slatke vode što ne utječe na propulziju. Tri minute nakon ispada niskotemperaturne pumpe rashladne vode dolazi do naglog povećanja temperature VT vode GM, pa se automatski smanjuje opterećenje motora i motor se zaustavlja.

Rezultat simulacije jasno prikazuje značajan utjecaj NT sustava na rad porivnog motora. Vrlo se jasno mogu iščitati visoka temperatura rashladne vode motora, nagla promjena temperature ispirnog zraka, povećane temperature ulja za podmazivanje GM, te vremenski protok smanjenja brzine vrtnje i zaustavljanje motora (SLOW DOWN, SHUT DOWN).



Slika 40. Rezultat simulacije utjecaja sustava NT vode na porivni motor

Prestankom rada pumpi VT sustava GM, nakon 14 sekundi pojavit će se alarm niskoga protoka rashladne vode, kao i pojedinačni alarmi cilindara glavnog motora (Slika 41.).



Slika 41. Rezultat simulacije utjecaja sustava VT vode na porivni motor

Nakon 23 sekunde dolazi do alarma niskoga tlaka rashladne vode, nakon 39 sekundi, kao posljedica prestanka rada rashladne pumpe motora, dolazi do alarma visoke temperature svih cilindara. U sljedećih pet sekundi dolazi do automatskog prestanka rada motora. U prikazu simulacije vidljiva je promjena temperature i tlaka vode, promjena temperature vode cilindara, devijacije temperatura ispušnih plinova, a ujedno je provjerena sigurnost zaštite motora, budući da se motor zaustavlja.

#### 4.4. Sustav podmazivanja

Funkcionalnost vitalnih dijelova motora u izravnoj je ovisnosti o kvaliteti podmazivanja, stoga je u brodskom strojnom kompleksu nužno koristiti ulje koje po svojim karakteristikama zadovoljava sve specifičnosti podmazivanja u promjenjivim uvjetima brodske propulzije. Da bi se održala kvaliteta, potrebno je temperaturu ulja održavati u određenim granicama, pa se kao temeljni regulacijski parametar uzima temperatura i tlak ulja na ulazu u motor. Danas je uobičajen sustav podmazivanja s polusuhim uljnim koritom (Slika 42.), gdje se ulje gravitacijski slijeva u servisni tank, koji se koristi kao rezervoar ulja. Uljno korito (karter) sadrži detektor uljnih para, koji pri visokoj koncentraciji uljnih para (60%), uključuje alarm u kontrolnoj prostoriji strojarnice, a ujedno je povezan s upravljanjem glavnog motora i automatski djeluje na smanjenje brzine vrtnje, da bi se izbjegla mogućnosti eksplozije. Vijčana pumpa crpi ulje iz slivnog tanka preko filtra i tlači ga na potreban tlak u motor.

Nestankom električne energije prestaje rad pumpe ulja, što izaziva pad tlaka ulja u motoru i automatski prestanak rada motora (SHUT DOWN).

Za održavanje željene temperature ulja služi rashladnik ulja, koji ima sličnu regulaciju kao rashladnik vode.

Bilanca topline rashladnika ulja može se opisati jednadžbama:

- strana ulja:

$$Q_{ud} - Q_{uo} = \frac{c_u dT_{u2}}{dt}$$

$$Q_{ud} = f(T_{u2}, T_{u1}, q_u)$$

$$Q_{uo} = f(T_{u2}, T_{u1}, q_u, T_{v2}, q_v),$$

- strana rashladne vode:

$$Q_{vd} - Q_{vo} = \frac{c_v dT_{v1}}{dt}$$

$$Q_{vd} = f(T_{u2}, T_{u1}, q_u, T_{v2}, q_v)$$

$$Q_{vo} = f(T_{v2}, q_v),$$

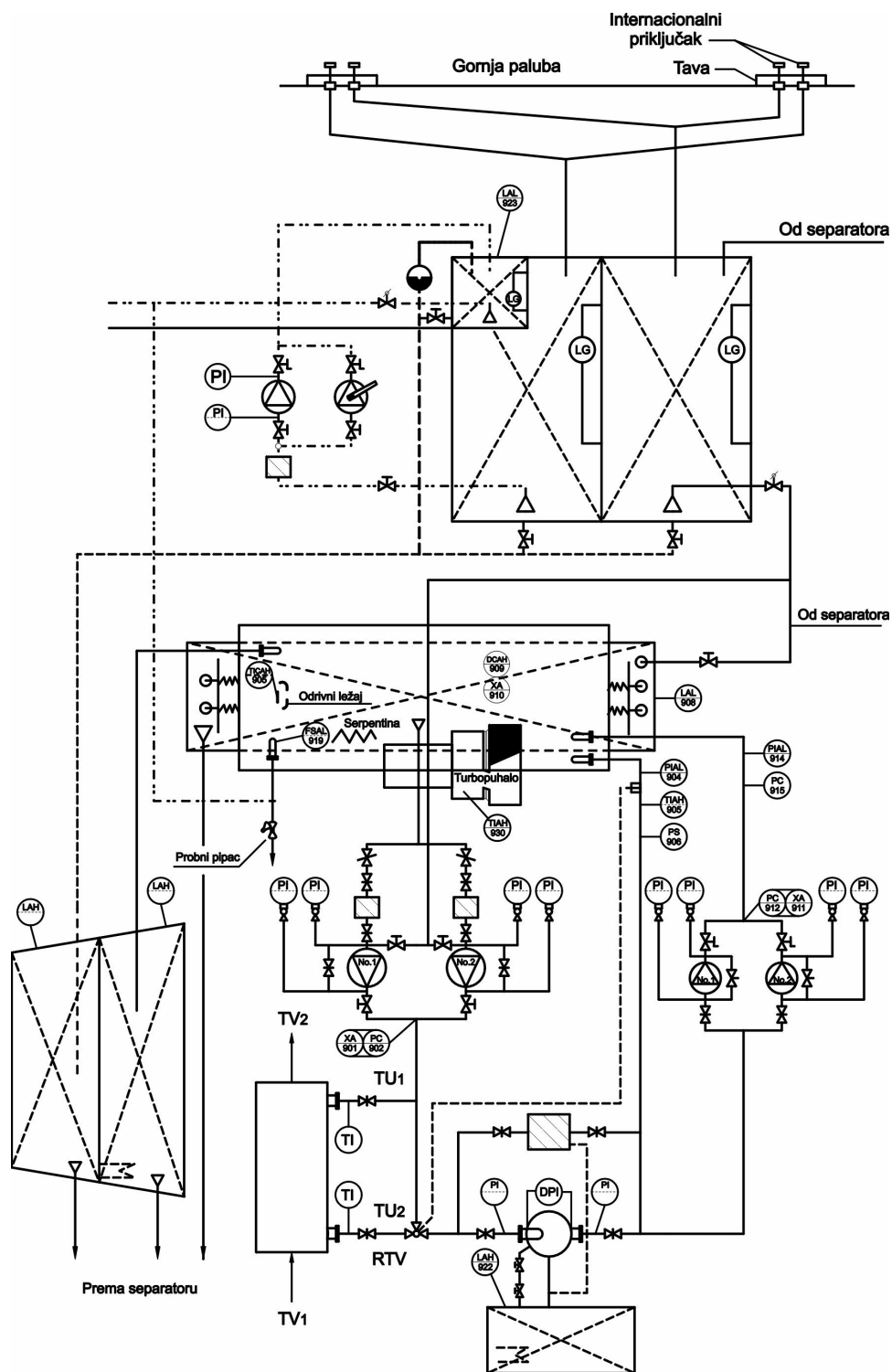
gdje je:

|                     |                                                                                   |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| $c_u$               | – toplinski kapacitet ulja za podmazivanje,                                       |
| $Q_{ud}$ i $Q_{uo}$ | – količina dovedene i odvedene topline, strana ulja,                              |
| $Q_{vd}$ i $Q_{vo}$ | – količina dovedene i odvedene topline, strana vode,                              |
| $T_{u2}$ i $T_{u1}$ | – temperatura ulja na ulazu i izlazu iz rashladnika (motora),                     |
| $T_{v1}$ i $T_{v2}$ | – temperatura rashladne vode na ulazu i izlazu iz rashladnika.                    |
| $q_u$               | – protok ulja kroz rashladnik određen položajem termoregulacijskog ventila (TRV), |
| $q_v$               | – protok rashladne vode kroz rashladnik,                                          |
| $c_v$               | – toplinski kapacitet rashladne vode.                                             |

Da bi se omogućilo prebacivanje i zamjena pumpi tijekom rada motora, na spoju tlačnih strana pumpi nalazi se presostat (PC), koji automatski prebacuje pumpe pri zadanom tlaku i upućuje pričuvnu pumpu. Istodobno se uključuje i alarm (XA) na pultu u kontrolnoj prostoriji strojarnice. Na izlazu iz filtra ulja, jedan je priključak izravno spojen sa glavnim motorom i služi za podmazivanje ležaja i ostalih dijelova motora, a drugi je priključak povezan s tankom ulja za križne glave. Neposredno prije ulaznog priključka ulja u motor nalaze se osjetnik tlaka s indikacijom i alarmom pri zadanom tlaku i osjetnik temperature s indikacijom i alarmom pri temperaturi od 55 °C. Narušavanjem parametara temperature i tlaka ulja, automatski dolazi do smanjenja brzine vrtnje motora, a pri minimalnom tlaku ulja reagira presostat, koji automatski zaustavlja rad motora.

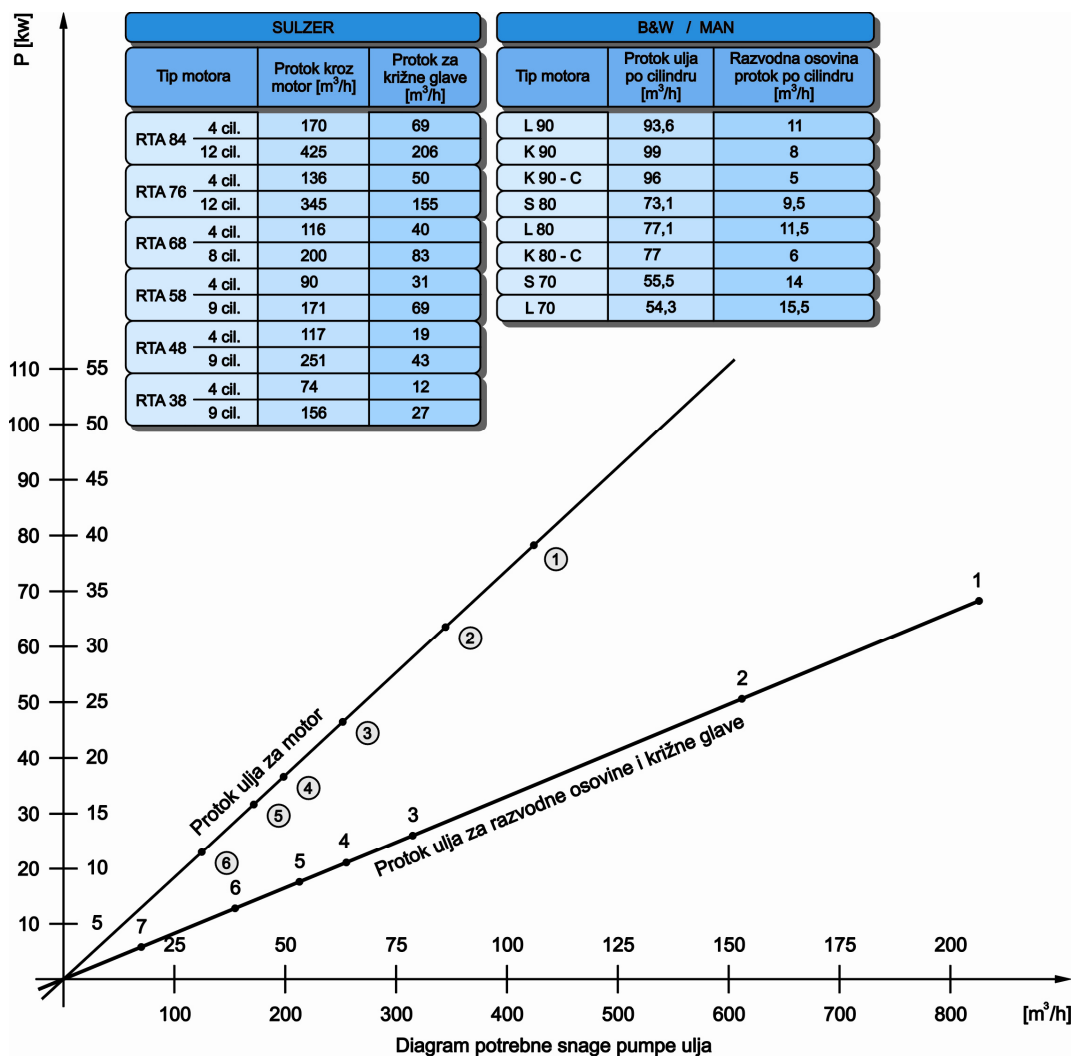
Sustav podmazivanja cilindara kod dvotaktnih sporookretnih dizelskih motora predstavlja zasebni sustav podmazivanja, potpuno odvojen od podmazivanja koljenaste osovine i križne glave. Kako se ulje iz skladišnog tanka cilindričnog ulja može prebacivati u dnevni tank pomoću ručne pumpe, sustav je faktički neovisan o električnoj energiji.

U novije se vrijeme, na novim tipovima motora, upotrebljava elektroničko ubrizgavanje ulja u cilindre, koji točno u određenom vremenu daje potrebnu količinu ulja u ovisnosti o opterećenju motora, što sustav čini ovisnim o električnoj energiji, pa to treba uzeti u obzir.



Slika 42. Shema ulja za podmazivanje glavnoga porivnog dizelskog motora

Iz navedenog je razvidno, da je kao i u prethodnim analizama, potrebno utvrditi snagu pumpe ulja cilindara i pumpe ulja križne glave, stoga je konstruiran dijagram (Slika 43.) iz kojega je, za glavne tipove porivnih dvotaktnih motora, to moguće definirati.



Slika 43. Dijagram za definiranje pumpe ulja za podmazivanje porivnog motora

## 4.5. Sustav goriva

Sustav goriva sastoji se iz više podsustava, a za ovo istraživanje relevantan je sustav pripreme goriva, koji osigurava potrebnu kvalitetu goriva za motor, te odgovarajuću dobavu u svim režimima rada. Sastoji se od tankova, pumpi, filtara, zagrijača, viskozimetra, ventila i cjevovoda. Porivni brodski dizelski motori koriste goriva različite vrste i kvalitete, teško i lako dizelsko gorivo.

Ukrcaj goriva nalazi se na glavnoj palubi (Slika 44.), a ukrcajne linije spojene su na glavni vod goriva u strojarnici koje se sustavom ventila granaju u linije cjevovoda koje vode do skladišnih tankova. Sustav prebacivanja goriva primjenjuje se za skladišta goriva i manipulaciju s taložnim tankovima ili s dnevnim tankovima goriva. Prebacivanje goriva u taložni ili dnevni tank obavlja se pomoću vijčanih pumpi. Pročišćavanje goriva izvodi se pomoću separatora teškog i lakog goriva, a separirano gorivo se prebacuje u dnevne tankove. U dnevnom tanku teškog goriva se održava adekvatna temperatura pomoću parnih serpentina koje su sastavni dio tanka. Iz dnevnog tanka gorivo se transferira u glavni motor, pomoćne motore i kotao ložen naftom.

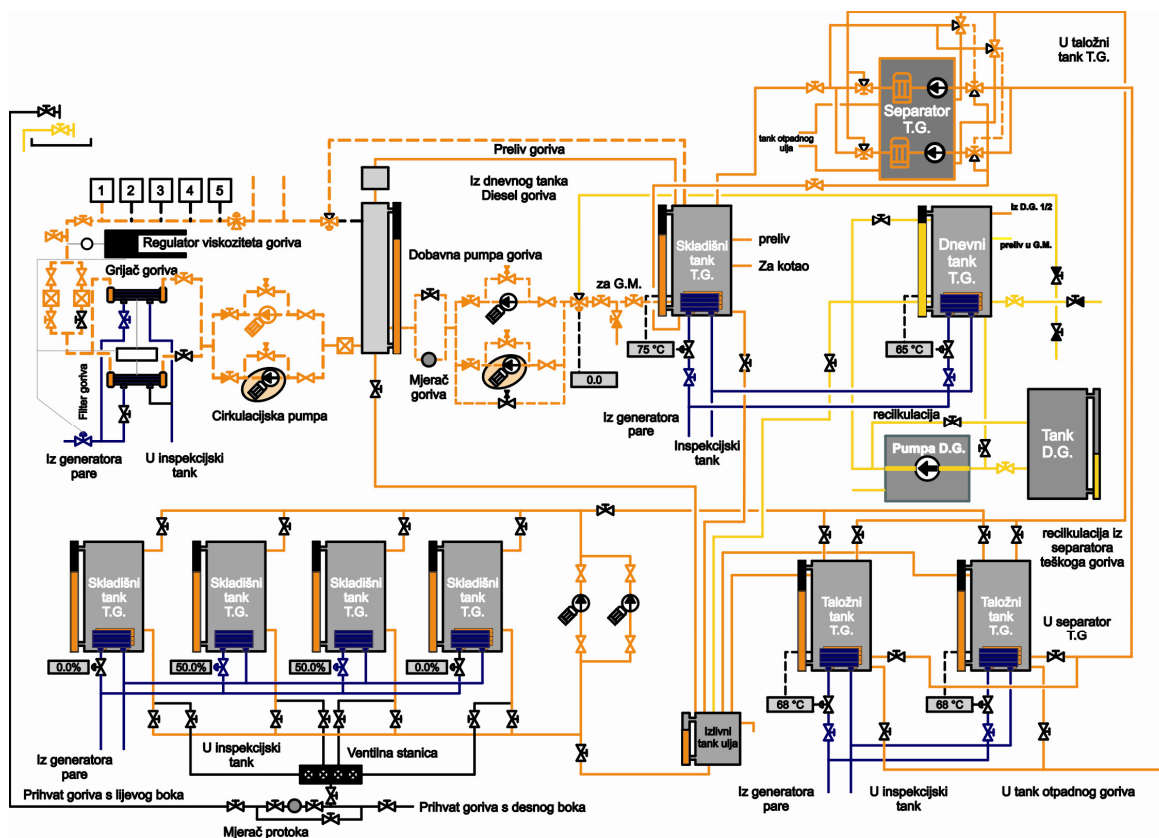
Potrebnu energiju za sustav pročišćavanja osiguravaju dobavna pumpa separatora i sam separator, a ovisna je o maksimalnom protoku goriva kroz separator i vremenu rada. Cirkulacijska pumpa goriva mora biti projektirana tako da može dobiti 2 do 2,5 puta više goriva nego što je najveći mogući potrošak goriva u motoru, što znači da je dobavna pumpa goriva dvostruko manja od cirkulacijske pumpe goriva.

Maksimalni radni protok kroz separator određen je izrazom:

$$Q = \frac{P \cdot b \cdot 24}{\rho \cdot t} \quad [\text{m}^3/\text{h}],$$

gdje je:

|        |                                                  |                           |
|--------|--------------------------------------------------|---------------------------|
| $P$    | – maksimalna kontinuirana snaga dizelskog motora | [kW]                      |
| $b$    | – specifična potrošnja goriva + 10% rezerve      | [gr/kWh]                  |
| $\rho$ | – gustoća goriva                                 | [kg/m <sup>3</sup> ]      |
| $t$    | – vrijeme separiranja po jednom danu             | (obično 23 h ili 23,5 h). |



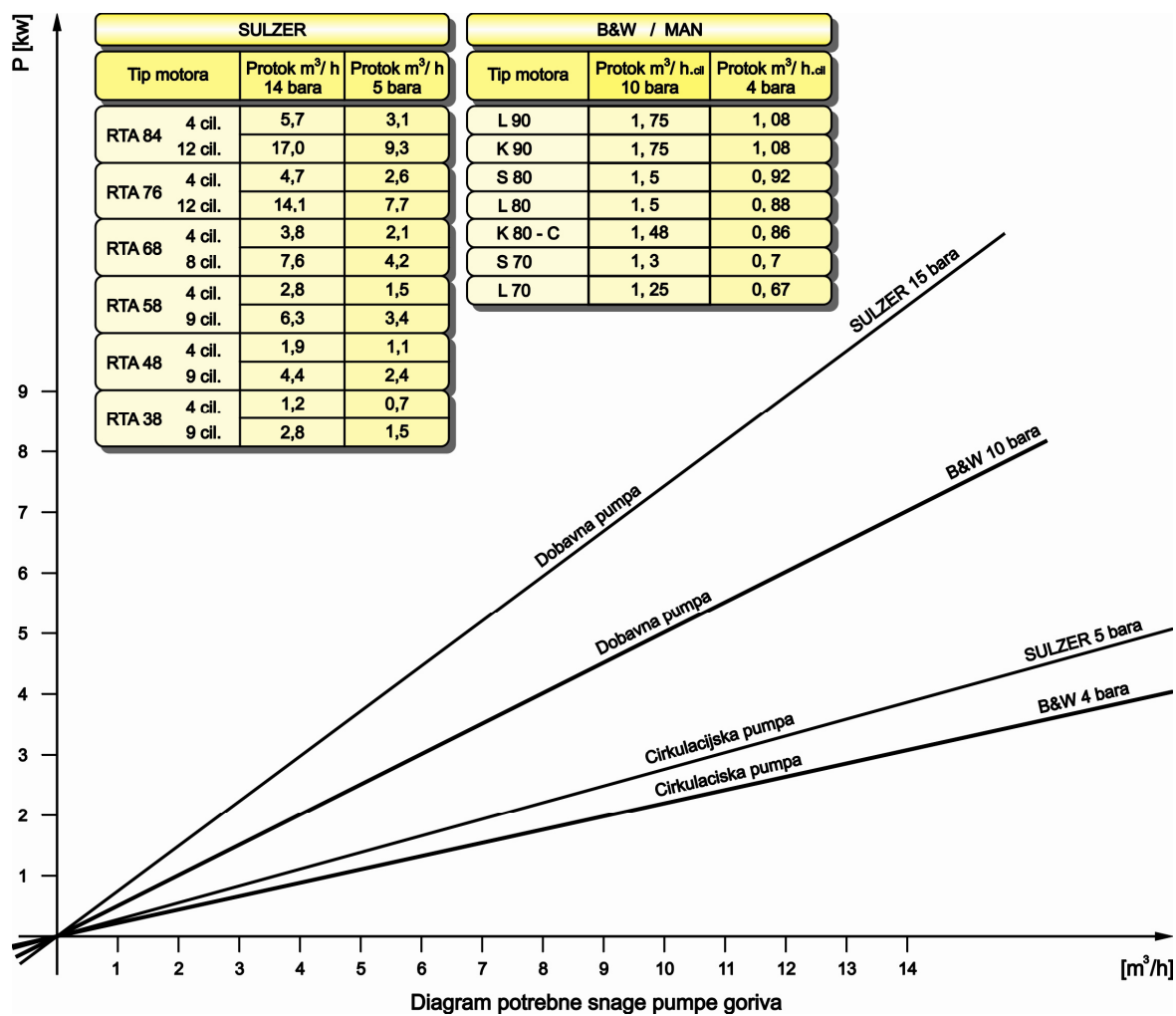
Slika 44. Sustav goriva

Maksimalni radni protok kroz separator ovisi o vrsti teškoga goriva, a obično se izražava kao postotak nominalnog kapaciteta separatora.

Sustav protoka goriva, ovisi o tipu porivnog motora i kvaliteti goriva. Niskotlačna dobavna pumpa crpi gorivo iz dnevnog tanka i tlači ga u sustav cirkulacijske pumpe, koja tlači gorivo ka visokotlačnim pumpama motora preko zagrijača, viskozimetra i filtra. Ovaj sustav je za sigurnost plovidbe najbitniji, pa u dnevnom tanku tijekom rada porivnog motora mora biti dovoljno goriva. Nestankom električne energije dolazi do prekida dotoka nafte i prestanka rada glavnog motora.

Proračun i dijagram potrebne snage pumpi goriva analiziranih porivnih motora (Slika 45.) određen je iz podataka o protoku i potrošnji goriva [24; 25].



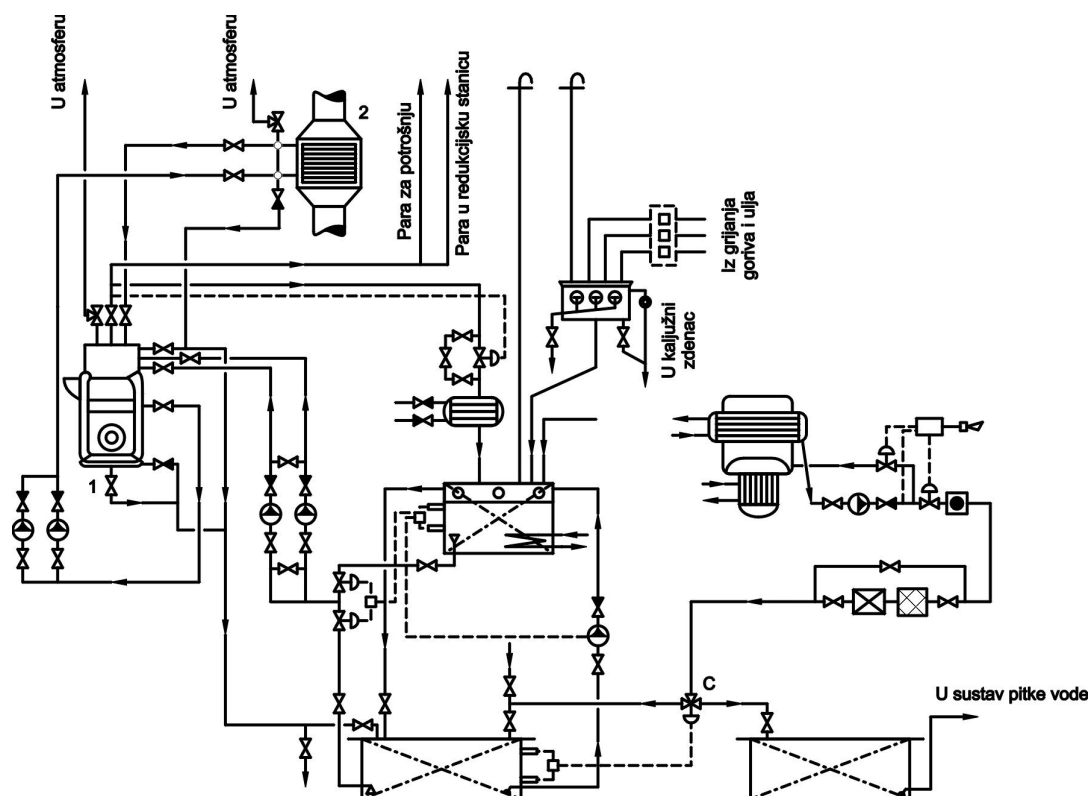


Slika 45. Dijagram za definiranje pumpi goriva

## 4.6. Sustav pare

Na brodu s motornim porivom, sustav pare i napojne vode spadaju u skupinu pomoćnih sustava, pa je kotlovsko postrojenje manjih kapaciteta nego na brodu s parnim pogonom. Nešto izraženiju ulogu ima sustav na brodovima s turbogeneratorima i turbopumpama tereta. Načelno se razlikuju dva tipa kotlovskih postrojenja i to s kotlom na ispušne plinove (utilizacijski kotao) i kotlom loženim naftom. Oba kotla služe za proizvodnju suho zasićene pare, radnog tlaka od 6 do 8 bara. Para je na brodovima zadržala funkciju osnovnog ogrjevnog medija za zagrijavanje porivnog motora, grijanje goriva i maziva, zagrijavanje klima komore, vode itd.

Iznimka su motorni tankeri koji koriste kotlove viših radnih tlakova koji većinom proizvode pregrijanu paru za pogon parnih turbina za pokretanje pumpi tereta. Para se koristi i za održavanje temperature tereta, koji mora biti u svakom trenutku u stanju da ga možemo iskrcati. Kombinirani pomoćni kotao predstavlja kombinaciju pomoćnog kotla loženog naftom i utilizacijskog kotla (Slika 46.).



Slika 46. Sustav napojne vode kombiniranog kotlovskog postrojenja

Kotlovsko postrojenje sastoji se od pomoćnog kotla loženog naftom 1 i pomoćnog kotla na dimne plinove glavnog motora 2 koji su međusobno povezani. Pomoćni kotao ložen naftom proizvodi paru kada ne radi glavni motor (nema ispušnih plinova), a tijekom navigacije potrebnu paru proizvodi pomoćni kotao (utilizator). U većini slučajeva, pomoćni kotao na ispušne plinove nema vlastiti prostor za akumulaciju vode i pare, već koristi prostor kotla na loženje, čime se postiže veći toplinski kapacitet utilizatora i ukupni stupanj iskoristivosti kotla loženog naftom.

Kondenzat pare koja je iskorištena za grijanje goriva i mazivnog ulja dovodi se u poseban kontrolni spremnik (mlaki zdenac) preko kondenzacijskih lonaca. Spremnik je izveden tako da omogućuje odvajanje ulja s površine kondenzata i njegovo prelijevanje u tank taloga. U mlakom zdencu se akumulira napojna voda, kako bi se omogućilo napajanje pomoćnih kotlova pri svim režimima rada postrojenja. Preko mlakog zdenca, sustav se nadopunjuje dodatnim količinama vode s pomoću nadolijevne pumpe, koja crpi vodu iz skladišnog spremnika. Radom nadolijevne pumpe upravlja se automatski s pomoću osjetnika niske i visoke razine vode, ugrađenih u krugu mlakog zdenca A. U slučaju oštećenja mlakog zdenca (značajno propuštanje spremnika) ili nadolijevne pumpe, automatski se s pomoću ventila B može preusmjeriti usis napojnih pumpi izravno iz skladišnog spremnika. Skladišni spremnik nadopunjuje se dotokom vode iz sustava generatora slatke vode, te eventualno kondenzatom iz klimatskog uređaja. Iz mlakog zdenca vodu crpi jedna od dviju napojnih pumpi, koje se u pravilu postavljaju ispod mlakog zdenca, da se osigura pozitivna usisna visina pumpi. Napojna voda u mlakom zdencu hladi se rashladnom morskom vodom, čime se temperatura vode održava ispod temperature zasićenja da ne bi došlo do kavitacije, budući da su pumpe centrifugalnog tipa. Kapacitet pumpi je 1,5 do 2 puta veći od ukupne potrošnje pare (maksimalne potrošnje), dok je njihov radni tlak za oko 25% veći od radnih tlakova pomoćnih kotlova, budući da pumpa mora svladati radni tlak pare u kotlu, visinu stupca tekućine od pumpe do napojne glave na kotlu, te otpore strujanja u napojnom cjevovodu. Ove pumpe tlače napojnu vodu isključivo u pomoćni kotao na loženje koji se napaja automatski, tj. automatskim uključivanjem i isključivanjem napojne pumpe s pomoću posebnoga nadolijevnog regulatora.

Kotao ložen naftom mora imati isti kapacitet kao utilizacijski kotao, čiji kapacitet ovisi o parametrima ispušnih plinova porivnog stroja, što znači da se prvo treba definirati kotao na ispušne plinove, a tek onda odabrati kotao ložen naftom. Kapacitet pare utilizacijskog kotla ovisi o opterećenju glavnog motora, a kako u određenim slučajevima može doći do smanjenja proizvodnje pare, mora postojati automatsko upućivanje kotla loženog naftom, da bi se pokrila potrebna količina pare na brodu.

Za istraživanje, potrebno je definirati snagu napojne pumpe i pumpe vode, te potrošnju ventilatora i gorača kotla. Iz analize bilanci pare na novogradnjama brodova izgrađenih u našim brodogradilištima, slijedi da se potrošnja pare na

teretnim brodovima nosivosti 20 000 do 100 000 brt., kreće od 1 000 do 2 500 kg/h suhozasićene pare tlaka do 8 bara. Tlak napojne i cirkulacijske pumpe vode iznosi do 11 bara.

Da bi se uputio porivni motor, nakon njegovog ispadanja iz sustava zbog nestanka električne energije na brodu, sustav pare nije neophodan, budući da je motor još uvijek topao i sposoban za upućivanje. Za upućivanje hladnog motora potrebno je prvo startati kotao ložen naftom, da bi se proizvela para za predgrijavanje i pripremu motora. Nakon upućivanja motora, prelazi se na utilizacijski kotao, koji zadovoljava proizvodnju pare potrebne za zagrijavanje teške nafte, te prelazak porivnog motora s lakog na teško gorivo. Iz navedenih razloga, za daljnje istraživanje nisu potrebne dodatne analize, odnosno dodatna poboljšanja sustava pare u brodskom strojnom kompleksu.

#### **4.7. Sustav zraka za upućivanje porivnog stroja**

Prema propisima registara [25], sustav zraka za upućivanje glavnog motora, mora biti izveden tako da se osigura stlaćeni zrak za neovisno prvo punjenje spremnika zraka, koje treba omogućiti istodobno upućivanje i preketanje svih porivnih strojeva. Potrebna količina stlaćenog zraka za upućivanje i upravljanje porivnih motora, mora se nalaziti u najmanje dva međusobno neovisna spremnika zraka ili dvije neovisne skupine spremnika.

Količina stlaćenog zraka u svim spremnicima namijenjenim za upućivanje i preketanje porivnih motora mora osigurati najmanje 12 uzastopnih upućivanja naizmjenice naprijed i natrag, za svaki motor koji je pripremljen za rad, kao i zrak potreban za upravljanje motora. Kod neprekretnih motora količina zraka mora biti dovoljna za najmanje 6 uzastopnih upućivanja svakog motora, a ukoliko ima više od dva motora, za najmanje 3 upućivanja svakog motora. Za upućivanje pomoćnih motora, mora se predvidjeti najmanje jedan spremnik zraka, dovoljnog volumena za 6 uzastopnih upućivanja motora najmanje snage. Ukoliko postoji samo jedan takav spremnik, mora se predvidjeti upućivanje pomoćnih motora i iz jednog spremnika porivnog motora.

Iz navedenoga se može konstatirati, da u brodskom strojnom kompleksu uvijek treba postojati dovoljna količina zraka za upućivanje porivnog stroja, budući da su propisi registara, koji se odnose na navedeni sustav, vrlo zahtjevni i precizni, te da nije potrebno proračunavati dodatnu snagu motora za pokretanje glavnog kompresora zraka.

## **5. POUZDANOST I RASPOLOŽIVOST BRODSKOG PORIVA**

Da bi se procijenio i analizirao određeni sustav, na raspolaganju su raznovrsne metode, poput modela pouzdanosti, raspoloživosti, sigurnosti i drugih. Procjena sustava je u potpunosti dio procesa projektiranja, teče paralelno s projektiranjem i pomoću nje je moguće otkriti nedostatke u projektiranju, te na vrijeme izvršiti korekcije. Ukoliko se to propusti i problem ostane u sustavu nakon realizacije, potrebno je, ukoliko je to moguće, izvršiti otklanjanje nedostataka ili preostaje prihvatanje sustava s degradiranim performansama. Proces vrednovanja, odnosno usporedbe sustava je u stvarnosti ključni dio procesa konstruiranja, budući da kasniji ustupci i modifikacije narušavaju glavni cilj konstrukcije, a to je da omogući bar približno optimalno rješenje sustava.

Tehnička realizacija samoga sustava je nužan (ne i dovoljan) uvjet korisničke efikasnosti i nezamislivo ju je na uspješan način realizirati, bez jasno definiranih kriterija kao što su raspoloživost, pouzdanost, pokrivanje grešaka i sigurnost. Navedeni kriteriji moraju biti vrlo jasno definirani, kako bi se izbjegle moguće neadekvatnosti u realizaciji.

Metode vrednovanja sustava čine kvantitativna i kvalitativna analiza. Kvalitativne metode su obično subjektivne i opisuju prednosti jednog rješenja pred drugim, za razliku od nabrojanih kvantitativnih tehnika vrednovanja i izračunavanja vrijednosti. Ove tehnike daju određeni iznos svojstava nekog sustava, zbog daljnjeg uspoređivanja s ostalim sustavima. Pritom pouzdanost nekog sustava može biti veća od drugoga, kao što kvaliteta jednog pristupa, može biti veća od kvalitete drugog. Stoga, "normalan" sustav s adekvatnom cijenom, često predstavlja prioritet pri odabiru.

## 5.1. Pouzdanost

Pouzdanost nekog sustava može se definirati [48] očekivanim vrijednostima potrebnim za pravilno, potpuno i pravovremeno izvođenje zadanih radnji.

Za potpuno razumijevanje pojma pouzdanost, potrebno je obraditi pojedina stanja kroz koje sustav prolazi u procesu eksploatacije, a može zbog nedostataka (*nedostatak*) iz sigurnosnog (*sigurnost*) stanja, preći u stanje ispada sustava. Nedostatak se jednostavno pojavi u fizikalnom ili u programskom segmentu sustava koji u svom određenom stanju prikaže nedostatak, koji dovodi do greške (*greška*) prikazane s neadekvatnim signalom ili vrijednošću. Ukoliko je greška stvarno postojala, tada definira tijek podataka u sustavu i prouzroči *nesigurnost*. Nesigurnost informacije ili stanja može i ne mora utjecati na nastajanje kvara (*kvar*), što ovisi o toleranciji podsustava na greške. Sam kvar podsustava neće nužno dovesti do degradacije (*degradacija*) podsustava koja faktički predstavlja zadnji korak, koji može prouzročiti ispad cjelokupnog sustava.

U određenom trenutku sustav može biti u jednom od navedenih stanja. Do ponovnog normalnog rada (nakon otklanjanja poznatih nedostataka) ili daljnjeg rada pod stanjem kvara (kvar će sve više rasti), dolazit će ovisno o prijelazu stanja sustava i to prema gore ka sigurnom stanju ili prema dolje ka stanju otkazivanja sustava.

Ukoliko se, kao primjer sustava koji prolazi kroz pojedina stanja, pretpostavi kvar podmazivanja pomoćnih motora, "scenarij" je sljedeći:

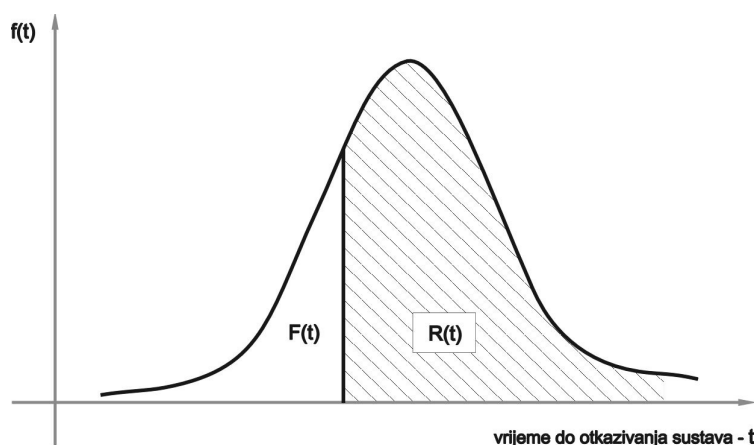
- motor je u **sigurnom** stanju i normalno radi;
- zbog propuštanja u sustavu podmazivanja, npr. zbog dotrajalosti brtvljenja, motor postepeno dolazi u stanje **nedostatka** tijekom rada,
- ukoliko se nedostatak pravovremeno ustanovi i otkloni, sustav prelazi u pozitivno stanje (prema gore), a ukoliko ne,
- propuštanje će biti sve veće i veće, pa se u sustavu pojavljuje alarm **greške**, što dovodi do stanja **nesigurnosti**,
- budući da razina ulja u karteru pada u nesigurno područje za podmazivanje motora, padom tlaka i količine protoka ulja u sustavu, dolazi do **kvara** i ujedno do **degradacije**,
- time se automatski zaustavlja motor, odnosno dolazi do ispada iz rada,
- to može dovesti do prestanka opskrbe električnom energijom glavnog porivnog stroja, te do otkazivanja čitavog sustava poriva broda, što predstavlja predmet istraživanja u ovome radu.

S ciljem optimiranja održavanja pojedinih dijelova i sustava na brodskim porivnim strojevima, a zbog sigurnosti poriva, potrebno je imati neophodne informacije o kvarovima pojedinih sustava, odnosno pojedinog elementa u sustavu. Mogućnost prikaza je vrlo mala, no moguće je prikazati trenutak promjene s nekom vjerojatnošću. Kako postoji mogućnost otklanjanja uzročnika promjene i ponovno upućivanje sustava, vrijeme kvara nekog tehničkog sustava smatra se nezaključeno promjenljivim, stoga je vrlo bitno poznavanje vrijednosti uzročnika kvara, njegovo stanje, te prikaz promjene u tijeku kvara.

Prikaz vremenskog kvara, ma kojeg tehničkog sustava, odnosno njegovih elemenata, moguć je međusobnim povezivanjima funkcija ovisnih o vremenu slučajnih promjena  $t$ :

- $f(t)$  - funkcija vjerojatnosti razdiobe za vrijeme do kvara,
- $F(t)$  - funkcija nepouzdanosti,
- $R(t)$  - funkcija pouzdanosti,
- $\lambda(T)$  - trenutna učestalost kvara.

Najčešće se oblik najvažnijeg promjenljivog parametra, vremena do kvara (Slika 47.), izražava funkcijom vjerojatnosti podjele.



Slika 47. Pouzdanost i nepouzdanost sustava, kao funkcija vjerojatnosti razdiobe vremena do kvara

Kako je  $f(t)$  funkcija vjerojatnosti razdiobe, a vrijeme do kvara varira u skladu s  $f(t)$  bez negativne vrijednosti, slijedi:

$$\int_{t_1}^{t_2} f(t) dt \quad \text{za } f(t) \geq 0 \text{ i za } \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = 1,$$

Uzevši za  $x$  slučajnu (stohastičku) promjenu varijable, koja nadzire vrijeme kvara slijedi:

$$F(t) = P(x \leq t)$$

gdje  $F(t)$  pokazuje vjerojatnost djelovanja sustava u intervalu od 0 do  $t$ . Ta je vrijednost izražena kao funkcija vjerojatnosti razdiobe za vrijeme do kvara.

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt.$$

Funkcija pouzdanosti komplementarna je s funkcijom nepouzdanosti i predviđena je kao vjerojatnost da će tehnički sustav raditi bez zastoja u intervalu od 0 do  $t$ ,

$$R(t) = [1 - F(t)] = \int_t^\infty f(t) dt.$$

Trenutnu učestalost kvara sustava, odnosno broja kvarova u jedinici vremena  $\lambda(t)$  može se odrediti iz izraza:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t \cdot R(t)}.$$

Učestalost pojavljivanja greške odnosno očekivani broj grešaka za određeno razdoblje:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}.$$

Međusobne odnose parametara  $f(t)$ ;  $F(t)$ ;  $R(t)$  i  $\lambda(t)$  može se odrediti iz izraza:

$$f(t) = \lambda(t)R(t) = \lambda(t)e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}.$$

Korisnu karakteristiku za ocjenjivanje sustava predstavlja srednja vrijednost do kvara  $MTTF$ <sup>18</sup>, a predstavlja očividno vrijeme rada sustava do prvog kvara.

<sup>18</sup> Mean Time To Failure



Ukoliko postoji  $N$  identičnih sustava, koji su stavljeni u rad u trenutku  $t = 0$ , te ako se mjeri vrijeme rada svakog sustava do prvog kvara,  $MTTF$  će iznositi:

$$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}.$$

$MTTF$  se može izračunati tako da se odredi očekivana vrijednost vremena do greške. Ukoliko je  $X$  promatrana slučajna varijabla, tada je  $MTTF$  matematičko očekivanje  $EX$  navedene varijable:

$$EX = \int_{-\infty}^{+\infty} t dF_X(t),$$

gdje je:

$F_X$  - funkcija razdiobe (distribucije)  $X$ , a kako je:

$$EX = \int_0^{+\infty} R(t) dt$$

slijedi da je:

$$MTTF = EX = 1/\lambda.$$

Srednje vrijednosti do kvara izražavaju se u satima, a učestalost kvarova  $\lambda$  brojem kvarova u jednom satu, danu, mjesecu itd.

Gruba podjela sustava [13] prema učestalosti kvarova je:

|                        |                               |
|------------------------|-------------------------------|
| vrlo visoka pouzdanost | $\lambda < 10^{-7}$           |
| umjerena pouzdanost    | $10^{-3} > \lambda > 10^{-7}$ |
| niska pouzdanost       | $\lambda > 10^{-3}$ .         |

Svaki sustav tijekom pogonskog trajanja, prolazi kroz stanje početnog startnog opterećenja (obično veća potrošnja), stanje normalnog rada i stanje istrošenosti. Kroz to razdoblje, funkcija učestalosti kvara podijeli se u krivulju učestalosti kvarova (Slika 48.).

U razdoblju uhodavanja sustava, može doći do dotrajalosti pojedinih dijelova sustava, što rezultira povećanim intenzitetom kvara. Kada je sustav u stanju normalnog rada, krivulje učestalosti kvarova opadaju i prelaze u pravac, da bi u fazi istrošenosti naglo rasle. Funkcija pouzdanosti eksponencijalno opada s

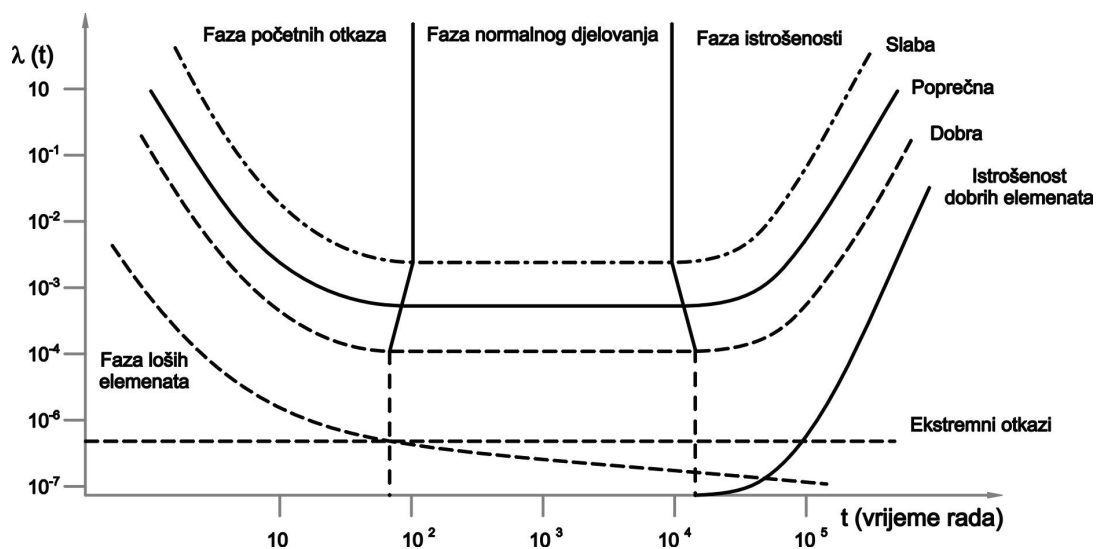
vremenom, što je poznato kao eksponencijalni zakon kvara i predstavlja važan čimbenik analize sustava. Ukoliko se u fazi normalnog rada, za funkciju trenutačne učestalosti kvara uzme  $\lambda(t) = \lambda$ , funkcija pouzdanosti i nepouzdanost se bitno pojednostavljaju.

Slijedi :

$$F(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$R(t) = e^{-\lambda t}.$$



Slika 48. Krivulja učestalosti kvarova

## 5.2. Održavanje sustava

Na fazu normalnog (korisnog) rada sustava, pored sigurnosti sustava, utječe i održavanje. Sposobnost održavanja predstavlja vjerojatnost da će tehnički sustav, koji je u kvaru, u određenom razdoblju ponovo biti u operativnom stanju. Pritom treba razlikovati pojam održavanja, od pojma održavanosti, koji je pokazatelj kvantitativnog poprečnog vremena popravaka  $MTTR$ <sup>19</sup>. Održavanje predstavlja aktivno vrijeme pregleda i po potrebi zamjene istrošenih dijelova, dok održavanost predstavlja predviđeno vrijeme pregleda i zamjene još neistrošenih komponenti sustava, kojim se želi produžiti faza normalnog rada.  $MTTR$  prikazuje aritmetičku sredinu podjele pojedinih aktivnosti vremenskog popravka  $TTR$ . Za različitih broj popravaka  $y$ ,  $MTTR$  iznosi:

$$MTTR = \sum_{i=1}^y \frac{TTR}{Y}.$$

Dobar pokazatelj održavanja predstavlja broj utrošenih sati na održavanje  $MMH/OH$  koji pokazuje indeks popravaka  $MI$ .

$$MI = MMH / OH = \frac{\text{utrošeni} \cdot \text{sati} \cdot u \cdot \text{određ.} \cdot \text{razdoblju}}{\text{vrijeme} \cdot \text{djelovanja} \cdot \text{sustava} \cdot u \cdot \text{određ.} \cdot \text{razdoblju}}.$$

Funkcija održavanosti  $M(t)$ , predstavlja trajanje sustava u neoperativnom stanju i definira se sigurnim povratkom sustava u operativno stanje u intervalu od 0 do  $t$ , ukoliko je sustav na početku u stanju neoperativnosti. Najčešće se prikazuje kao funkcija parametara održavanja,

$$MTTR = \int_0^{\infty} [1 - M(t)] dt.$$

Ukoliko se broj izvršenih popravaka označimo sa  $N_p$ , a vremensko stanje svakog popravka sa  $t_i$ , ocjena prosječnog vremenskog trajanja popravka može se dobiti iz izraza:

$$MTTR = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} t_i.$$

---

<sup>19</sup> Mean TimeTo Repair

**Raspoloživost sustava A** predstavlja dio vremena tijekom kojega će sustav biti spreman za rad na zadovoljavajući način, odnosno postotak vremena kada je sustav raspoloživ da izvršava svoje zadaće. Vjerojatnost da će sustav biti raspoloživ, u eksploataciju je važniji od pouzdanosti istog.

Projektna raspoloživost  $A_p$ , ovisna je o učestalosti kvara  $\lambda$  i vjerojatnosti da će sustav biti popravljen  $\mu$ :

$$A_p(t) = \left( \frac{\mu}{\mu + \lambda} \right) + \left( \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \right) \cdot e^{-(\mu + \lambda)t}.$$

S vremenskim povećanjem, raspoloživost sustava se približava nekoj konstantnoj vrijednosti:

$$A_p = \lim_{t \rightarrow \infty} A_p(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda},$$

odnosno:

$$A_p = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}.$$

Za stvarnu raspoloživost sustava vrijedi isti pristup, pa se nakon dužeg vremena,  $A_p(t)$  približava konačnoj vrijednosti, koja se uzima kao raspoloživost za dugo razdoblje ili stacionirana raspoloživost:

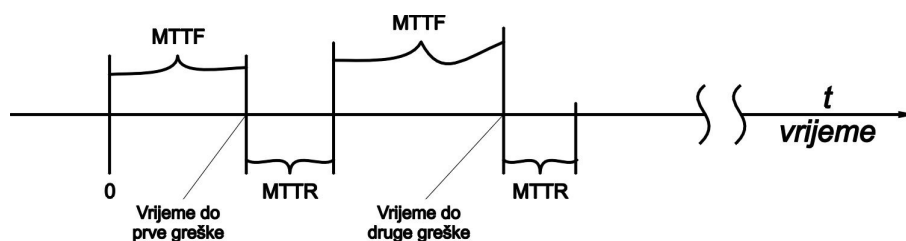
$$A_p(t) = A_p(\infty) = \frac{\mu}{\mu + \lambda}.$$

Između srednjeg vremena kvara  $MTTF$  i srednjeg vremena između kvara  $MTBF^{20}$ , postoji konceptualno vrlo značajna razlika koja je u većini slučajeva numerički vrlo mala.  $MTBF$  je ukupno vrijeme rada  $T$ , podijeljeno sa srednjim brojem kvarova u tijeku vremena  $T$ . Ukoliko se pretpostavi, da svi popravci čine sustav ponovno savršenim, kao kada je bio nov, može se prikazati odnos između  $MTTF$  i  $MTBF$  (Slika 49.)

Kako je u praksi  $MTTR$  dosta manji od  $MTTF$ , slijedi da je  $MTBF$  približno jednak  $MTTF$  [10],

$$MTBF = MTTF + MTTR.$$

<sup>20</sup> Mean time between failure



Slika 49. Odnos između srednje vrijednosti kvara i vrijednosti kvara

Kod projektiranja dijagnostičkog sustava, važan parametar predstavlja *pokrivanje greške*. Ukoliko sustav ima mogućnost pokrivanja greške, to bitno utječe na njegovu pouzdanost, sigurnost i raspoloživost. Pokrivanje greške predstavlja mjeru sposobnosti sustava da izvede detekciju, lokalizaciju i maskiranje greške, i/ili obnovu neispravnosti. Pokrivanje greške  $C$  je definirano kao uvjetna vrijednost obnavljanja sustava, pod uvjetom da se greška detektira [ 15 ],

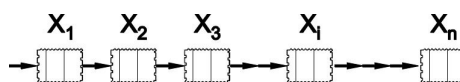
$$C = P \text{ (sustav obnovljen/greška postoji).}$$

Osnovni problem s faktorom pokrivanja greške je u njegovom vrlo teškom izračunavanju, pa se najčešće razvije lista svih grešaka koje se u nekom sustavu mogu detektirati, locirati i prevladati. Ako se taj broj podijeli sa brojem svih grešaka koje se mogu dogoditi u sustavima, dobit će se faktor pokrivanja greške  $C$ .

### 5.3. Pouzdanost sustava

Pouzdanost sustava predstavlja sposobnost sustava za neprekidno obavljanje njegove funkcije tijekom promatranog vremena. Temeljna je pretpostavka, da je na početku razdoblja sustav sposoban obavljati zahtijevanu funkciju. Najčešće, pri analizi pouzdanosti, primjenjujemo analitički pristup, a elemente sustava dijelimo u čimbenike serijske i paralelne pouzdanosti.

Kod modela serijske pouzdanosti (Slika 50.), kvar bilo kojeg podsustava izaziva kvar cjelokupnog sustava, pa pouzdanost cijelog sustava ovisi o vrijednosti djelovanja (ili pouzdanosti  $R_i$ ) svakog pojedinog elementa  $P(X_i)$ . Pouzdanost cjelokupnog sustava jednaka je umnošku vjerojatnosti svih pojedinih elemenata sustava.



Slika 50. Model serijski povezanih elemenata

$$R(t) = \prod_{i=1}^N R_i(t)$$

Izrada serijski pouzdanog sustava je vrlo skupa i zahtjevna. Za razliku od serijskog, sustav s paralelnom pouzdanosti će otkazati samo ukoliko otkazu svi njegovi podsustavi. Ukoliko su kvarovi neovisni, a  $R_i$  je pouzdanost modula, pouzdanost cijelog sustava biti će :

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - R_i(t)]$$

Paralelna pouzdanost, povećava ukupnu pouzdanost sustava i omogućava izradu pouzdanog sustava unatoč nepouzdanosti njegovih komponenti, međutim troškovi takvog sustava bit će u startu veći.

***Ukoliko se na brodu nalaze tri redundantna modela pomoćnih motora, a samo je jedan od njih dovoljan da bi sustav propulzije na brodu ispravno radio, pouzdanost se definira kao mogućnost da jedan od ta tri modula ispravno radi.***

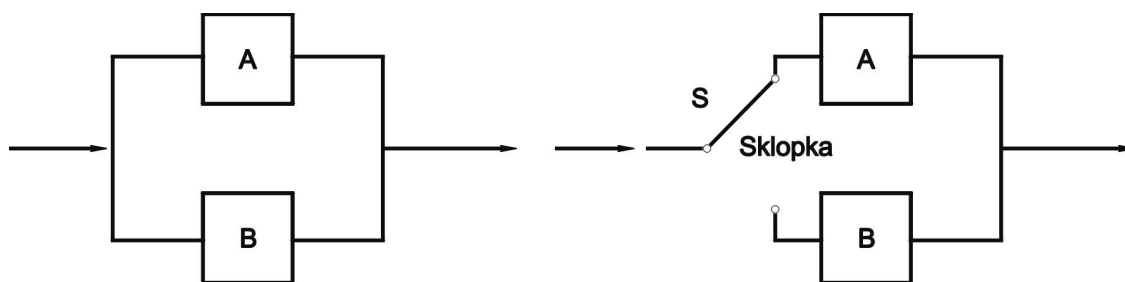
Nažalost, ne može se realno pretpostaviti suvišno pokrivanje greške, pa time i sigurnu mogućnost iskorištenja zalihosti, budući da bi trebalo sa sigurnošću identificirati neispravni model, isključiti isti i nastaviti rad bez

neispravnog modula. Ukoliko se analizira jednostavni paralelni sustav, koji sadrži dva identična modula, npr. dva pomoćna motora u brodskom strojnom kompleksu i pretpostavi da jedan normalno radi, a drugi modul je u pričuvi i startat će u slučaju greške prvoga modula, prije nego što drugi modul bude stavljen u pogon, neispravnost prvog modula mora biti detektirana i izvršeni odgovarajući postupci (isključenje dovoda električne energije, prekid dovoda goriva). Drugim riječima, paralelni sustav s dva modula funkcionira ispravno sve dok zadovoljava jedan od uvjeta:

- modul jedan radi ispravno, modul dva je u pričuvi.
- modul dva radi ispravno, modul jedan je neispravan, pogreška je detektirana i izvršen je odgovarajući postupak za komutaciju.

Pojam **redundantnosti** sustava (zalihosti), predstavlja uključivanje dodatnih elemenata ili podsustava, s namjenom povećanja pouzdanosti sustava [6].

Serijski sustav ne može biti redundantan, budući da prestankom rada pojedinih elemenata, ispada kompletan sustav. Međutim, paralelnom sustavu ispadom jednoga elementa ostaje najmanje još jedan element u sustavu. Taj dodatni element može biti u aktivnom ili pasivnom sustavu djelovanja (Slika 51.).



Slika 51. Aktivna i pasivna redundancija

Za pasivni sklop, redundancija znači ukopčavanje pričuvnog (stand by) elementa pri ispadu glavnog djelujućeg elementa, pa pasivna redundancija nije jednaka aktivnoj, budući da postoji još i umjesni član (sklopka), odnosno proces pokretanja ili priprema sustava za pokretanje.

## 5.4. Analiza baza podataka kvarova poriva broda

Za ozbiljnu analizu kvarova na tehničkim sustavima broda, vezanih za poriv broda, potrebno je obraditi veliki broj podataka pohranjenih u bazama sustava, u kojima su prikupljene karakteristike kvarova. Najbolje baze su one koje su prikupila klasifikacijska društva (registri), osiguravajuća društva, proizvođači motora, te državne ustanove koje vode računa o sigurnosti plovidbe i pomorstva.

Pouzdanost pojedinih brodskih uređaja može se utvrditi iz vrlo opširne tehničke literature koja stoji na raspolaganju, međutim, puno je značajnija tzv. povratna veza pouzdanosti nakon određenog vremena eksploatacije. Propisi registara koliko god nastoje biti slični, u pojedinim se područjima ipak dosta razlikuju. Uz propise registara, često se pri gradnji broda postavljaju i zahtjevi da oprema ili pojedini njeni dijelovi odgovaraju preporukama, pravilima i standardima pojedinih nacionalnih udruženja ili komiteta, što dodatno otežava analizu i sistematizaciju.

### 5.4.1. Baza podataka CIMAC

Baza podataka CIMAC<sup>21</sup> [79], obuhvaća karakteristike kvarova na porivnim motorima i generiranju električne energije. Podaci su sistematizirani po vrsti broda, tipu motora, promjeru cilindra, hodu stapa, brzini vrtnje, srednjem efektivnom tlaku u cilindru, vrsti goriva, proizvođaču motora, starosti postrojenja i vrsti generatora. Zabilježene su vrste kvarova, datum kvara i broj radni sati, prikazan je kratak opis i postupak sanacije od strane posade ili proizvođača opreme, te realizacija na dojavu kvara na uređaju.

Zabilježeni kvarovi koji su se dogodili na motorima tijekom eksploatacije broda mogu se sistematizirati u jednu od deset osnovnih komponenti sustava:

- glave motora,
- stap, ojnica i stapni prstenovi,
- košuljica cilindra s podmazivanjem,
- križna glava i ojnica,
- koljenasta osovina, odrivni ležaj i uređaj za okretanje motora
- regulator brzine vrtnje,
- sustav upućivanja motora sa zrakom,
- ispušni ventili,

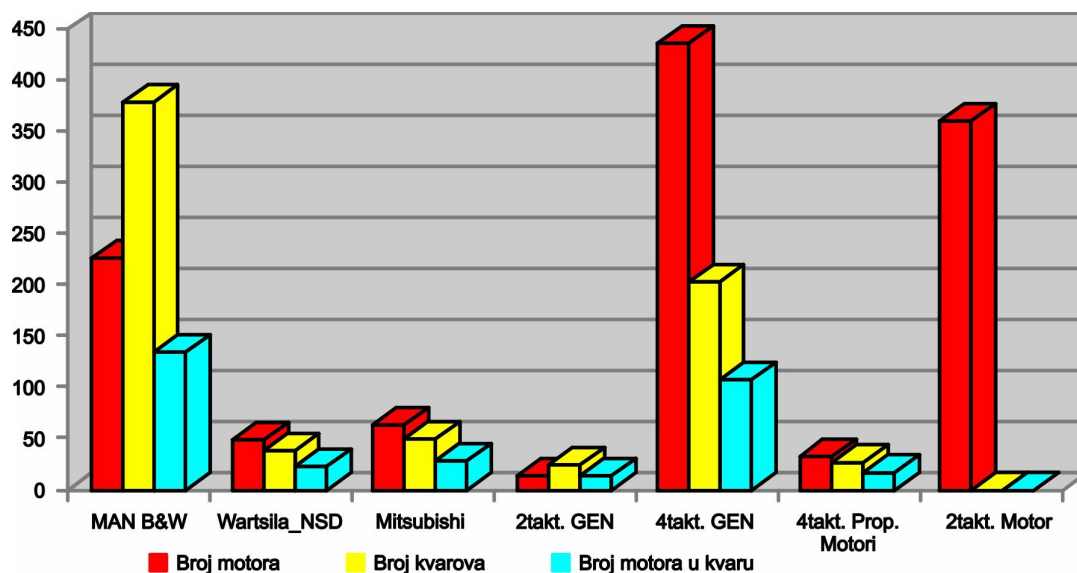
---

<sup>21</sup> *Conseil International des Machines a Combustion*



- sustav goriva,
- turbopuhalo s podsustavima.

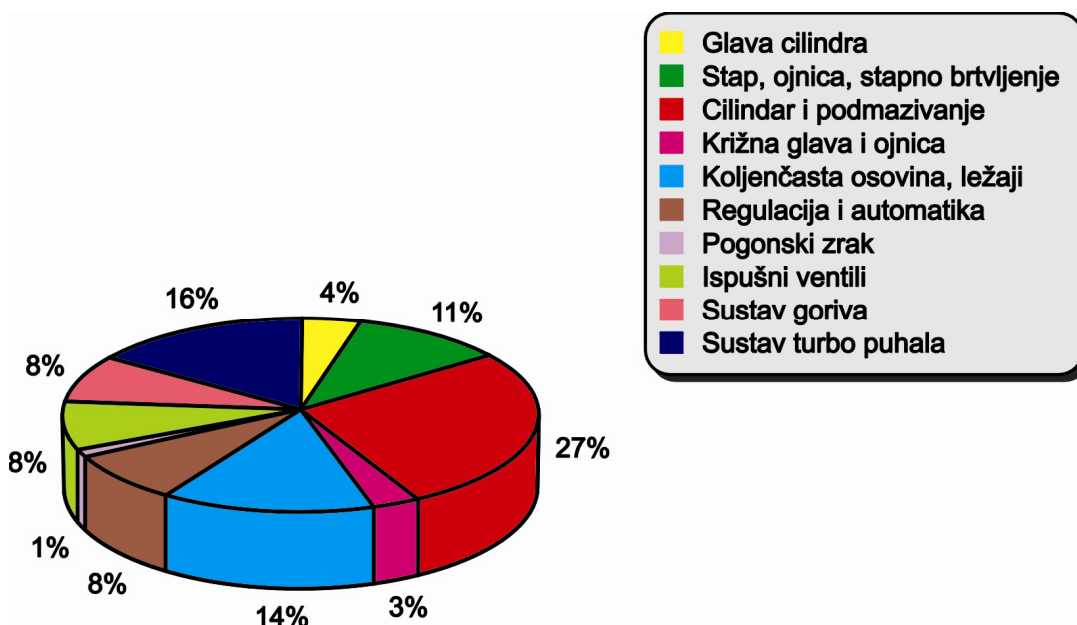
Bazom podataka je obuhvaćeno 826 dvotaktnih i četverotaktnih motora (Slika 52.) glavnih svjetskih proizvođača. Većinom su kao pomoćno motori korišteni četverotaktni motori, a od maloga broja četverotaktnih motora, koji su služili kao porivni, većina ih je ugrađena na Ro – Ro brodove. Također se može potvrditi, da se dvotaktni motori ne upotrebljavaju za pogon generatora.



Slika 52. Sistematizacija kvarova na brodskim motorima

Veliki broj kvarova na motorima skoncentriran je u okolini prostora za izgaranje, odnosno glave motora, ispušnih ventila i stapa. Kod motora koji imaju promjer stapala veći od 800 mm, 81 % svih kvarova grupirano je u navedenom području, dok se za manje promjere postotak kvarova kreće oko 62 %.

Kod dvotaktnih porivnih motora (Slika 53.), najviše se kvarova događa na košuljici cilindara. Dosta problema izaziva i sustav turbopuhala, vjerojatno zbog sve većeg tlaka ispušnog zraka, koji se zahtijeva za sve veće snage motora. Sve su veći problemi i kod rashladnog zraka, a neadekvatnim utemeljenjem motora te dilatacijom strukture broda, strada također veliki broj ležajeva koljenaste osovine.



Slika 53. Koncentracija kvarova na velikim dvotaktnim motorima

#### 5.4.2. Baza Japanskog komiteta za sigurnost broda – JSRIC<sup>22</sup>

U petnaestogodišnjem razdoblju od 1982 do 1997., JSRIC je skupio podatke s 224 broda, koji su ukupno napravili sedam miliona sati rada brodskog vijka [24]. Evidentirano je 6 800 kvarova na glavnom motoru, od kojih je 1700 kritičkih kvarova porivnog uređaja ili generatora što iznosi oko 25 %. Uzrok ovako velikog postotka kritičkih kvarova je nedovoljna redundantnost sustava, budući da je od 224 broda samo 19 brodova imalo paralelni redundantni porivni sustav.

Podaci koje je JSRIC objavio za generatore, na broju od 102 seta paralelno instaliranih sustava, pokazuju da je prosječan broj generatora po brodu bio 2,7 i to na 12 brodova po dva generatora i na 26 brodova po 3 generatora. Na kraju dvadesetog stoljeća, taj je prosječni broj u Japanu narastao na 2,9 generatora po brodu (Tabela 4.).

Analizirajući broj ugrađenih generatora unazad 33 godine, dolazi se do saznanja da je indeks redundantnosti povećan za 0,2 generatora po brodu.

U analizi nisu obrađivani turbogeneratori i osovinski generatori, budući da se oni računaju kao dopunski izvori električne energije na brodu. Ukoliko bi se njih uključilo u analizu, prosjek bi narastao i do 3,5 generatora po brodu. Analizirajući statističke parametre svih kvarova i kritičnih kvarova redundantnih sustava

<sup>22</sup> Ship Reliability Investigation Committee in Japan

generatora (Tabela 5.), gdje su se na sustavu s jednim generatorom dogodila dva kritična kvara, na sustavu s dva generatora 35 kvarova, na sustavu s tri generatora 36 kvarova, a sa četiri generatora 76 kritičnih kvarova, slijedi da porastom zalihosti dolazi do proporcionalnog povećanja kvarova. Također je vidljivo da se za popravak kod većeg stupnja redundantnosti, utroši više vremena.

Tabela 4. Redundantni paralelni sustavi generatora

| <i>Br.generatora/brodu</i> | <i>Broj brodova</i> | <i>%</i> | <i>Ukupno gen.</i> | <i>%</i> |
|----------------------------|---------------------|----------|--------------------|----------|
| 2                          | 38                  | 16,74    | 76                 | 11,5     |
| 3                          | 172                 | 75,77    | 516                | 78,1     |
| 4                          | 16                  | 7,05     | 64                 | 9,7      |
| 5                          | 1                   | 0,44     | 5                  | 0,7      |
|                            | $\Sigma 227$        |          | $\Sigma 661$       |          |

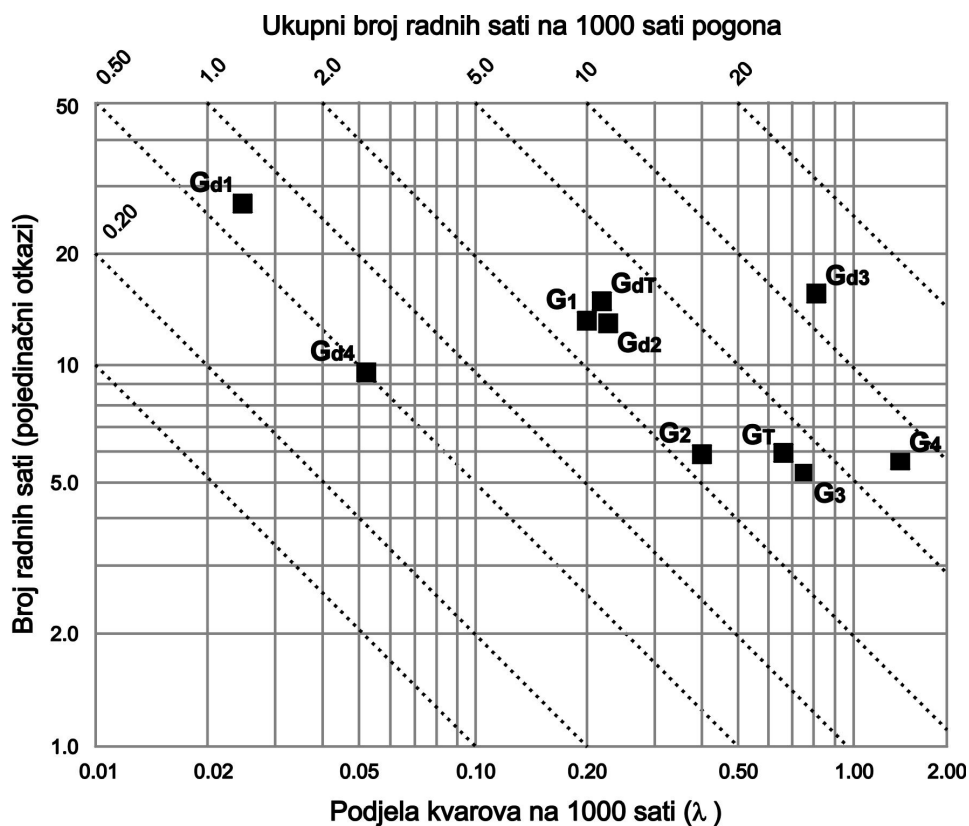
Na osnovi prikazanih parametara moguće je izraditi multivarijabilni dijagram parametara razdiobe kvarova (Slika 54.), te prikazati podjelu svih kvarova redundantnih sustava  $G_i$  ( $i = 1 \div 4$ ), karakterističnih kvarova pojedinih sustava  $G_{di}$  (1 do 4), zajedničkih kvarova  $G_T$ , te zajednički kritičnih kvarova svih sustava  $G_{dT}$ .

Analizom dijagrama, može se zaključiti da je raspodjela zajedničkih kvarova za sve sustave (osim  $G_1$ ) u području većem od 0,4 kvara na 1000 radnih sati, a da je za popravak pojedinih kvarova utrošeno manje od 6 radnih sati (izuzev  $G_1$ ). Za saniranje kritičnih kvarova potrebno je puno više vremena, a najpovoljniji odnos je kod sustava  $G_{d4}$ , pri kojem je u prosjeku utrošeno 9,67 radnih sati. Uočljivo je odstupanje kod popravaka sustava  $G_{d1}$  i  $G_{d4}$ . S gledišta održavanja, najstabilniji je sustav  $G_{d3}$ , kojega je potrebno održavati više od 120 radnih sati na godinu (1 godina = 8760 sati).

Za saniranje kritičnih kvarova potrebno je 1,5 do 3 puta više radnih sati od pojedinačnih kvarova. Sve navedene činjenice iz analize itekako treba uzeti u obzir kod odabira stupnja redundantnosti sustava generatora električne energije.

Tabela 5. Statistički parametri kvarova redundantnih sustava generatora

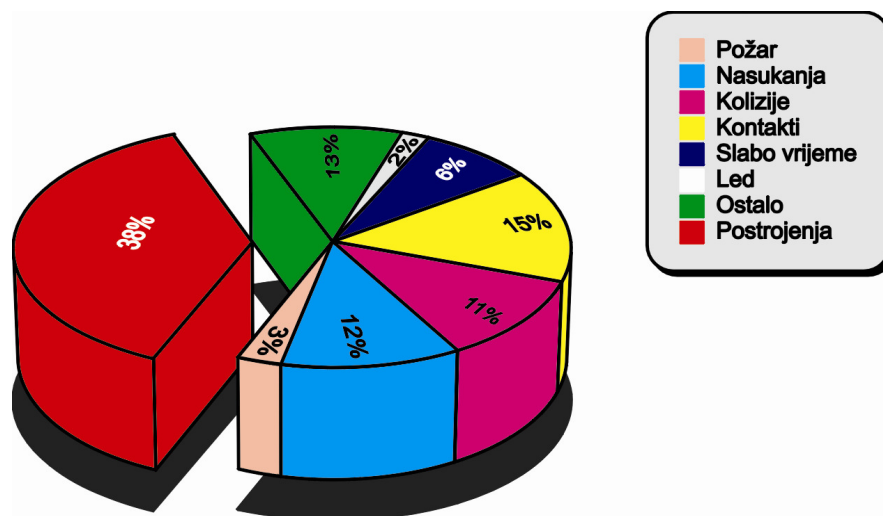
| stupanj<br>redundant. $G_n$        | učestalost<br>kvara $\lambda$ | srednje vrijeme<br>popravka<br>čovjek-sat mh | indeks<br>popravka MI<br>$MI=\lambda$ mh | sred. izgubljeno<br>vrijeme / ukupno<br>izgub. vrijeme |
|------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| (broj stapova<br>po generatoru)    | kvar / 1000 h                 | mh / kvar                                    | mh / 1000 h                              | $\frac{h}{kvar} / h$                                   |
|                                    | kvarovi /<br>kritični kvar.   | kvarovi /<br>kritični kvar.                  | kvarovi /<br>kritični kvar.              |                                                        |
| jednost. $G_1$<br>(6 i 8 stapova)  | 0,215 / 0,025                 | 13,13 / 26,90                                | 2,83 / 0,625                             | 1,58 / 3,16                                            |
| dvostup. $G_2$<br>(6,8 i 14 stap.) | 0,439 / 0,247                 | 5,91 / 12,80                                 | 2,59 / 3,50                              | 2,79 / 97,65                                           |
| trostup. $G_3$<br>(6 i 8 stapova)  | 0,825 / 0,892                 | 5,31 / 15,40                                 | 4,36 / 13,75                             | 0,355 / 12,7                                           |
| četverost. $G_4$<br>(6 i 8 stap.)  | 1,510 / 0,053                 | 5,63 / 9,67                                  | 8,45 / 0,51                              | 0,61 / 1,83                                            |
| $G_T / G_{dT}$                     | 0,682 / 0,238                 | 5,64 / 14,2                                  | 3,97 / 3,40                              | 1,52 / 115,4                                           |



Slika 54. Multivarijabilni dijagram razdiobe kvarova

### 5.4.3. Baza podataka Švedskog osigurav. društva – Swedish Club

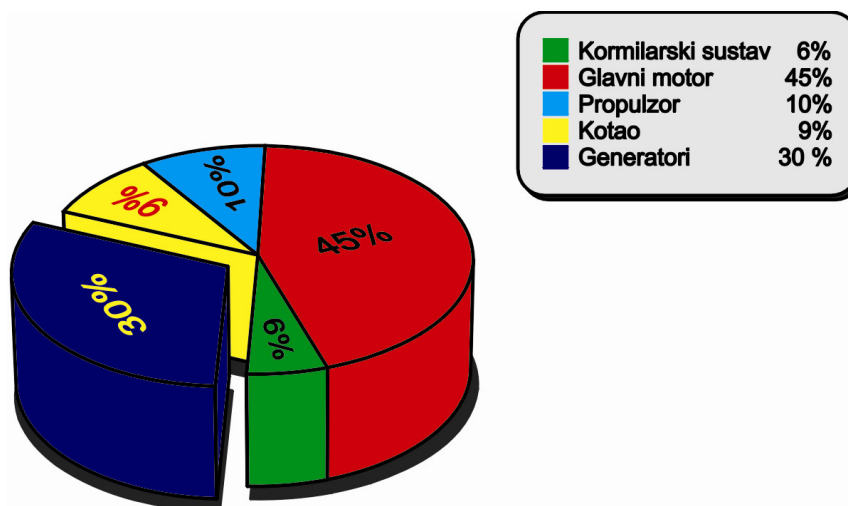
Swedish Club je pomorsko osiguranje u vlasništvu brodovlasnika. Njihova je baza podataka osobito značajna, iz razloga što brodovlasnici u kvaru brodskog sustava vide povratne štete, koje bi im trebalo nadoknaditi osiguravajuće društvo. Budući da se brodovlasnici ovdje nalaze u dvojakoj ulozi, njihovi su pokazatelji osobito precizni i objektivni. U analizi su korištene baze podataka [26] koje se odnose na razdoblje od 1988. do 1997. godine (Slika 55.).



Slika 55. Sistematizacija kvarova prijavljenih Swedish Club-u od 1988. do 1997. (prema uzroku)

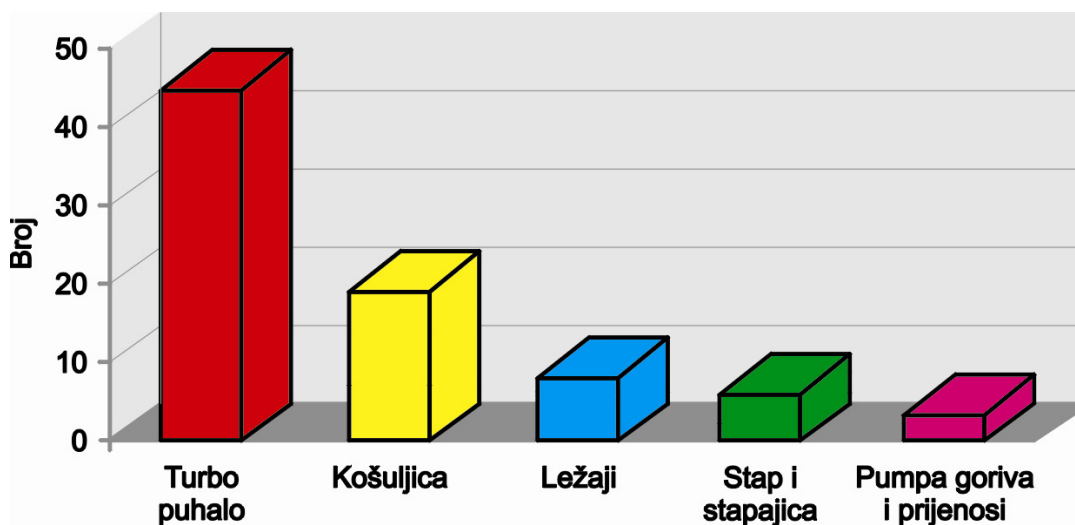
Evidentirani su samo kvarovi veći od 10 000 dolara, pri čemu je prosječna šteta na trupu broda i porivnom uređaju bila 100 000 dolara. U navedenom razdoblju broj prijavljenih šteta klubu bio je 1 681 (Slika 56.).

Na početku perioda u prosjeku je godišnje štetu prijavljivao jedan brod, da bi u zadnje dvije prikazane godine, štetu prijavio svaki peti brod. Najveći postotak prijavljenih kvarova (45%) odnosi se na glavni motor, a nakon toga na generatore električne energije (30%), što predstavlja jedan od glavnih argumenata za istraživanje kojim se bavi ovaj rad.



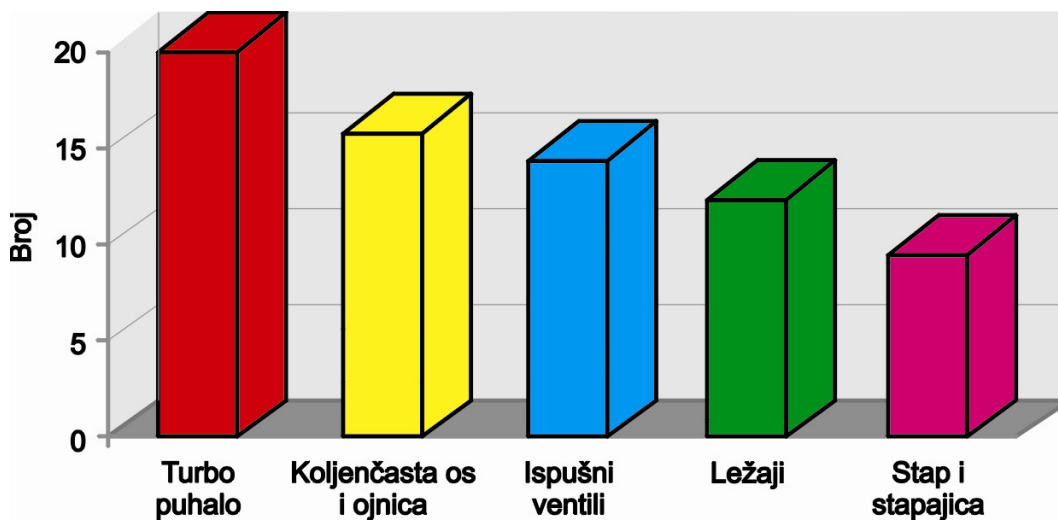
Slika 56. Sistematizacija kvarova prijavljenih Swedish Club-u od 1988. do 1997.(prema mjestu)

Najčešće oštećeni dijelovi porivnih motora odnosili su se na turbopuhala i košuljice cilindara (Slika 57.).



Slika 57. Najčešći kvarovi na porivnim motorima

Kod motora za pogon generatora električne energije, odnosno kod srednjookretnih i brzookretnih motora, najčešći kvarovi se također odnose na turbopuhala, a nakon toga na koljenastu osovinu i ojnicu (Slika 58.).



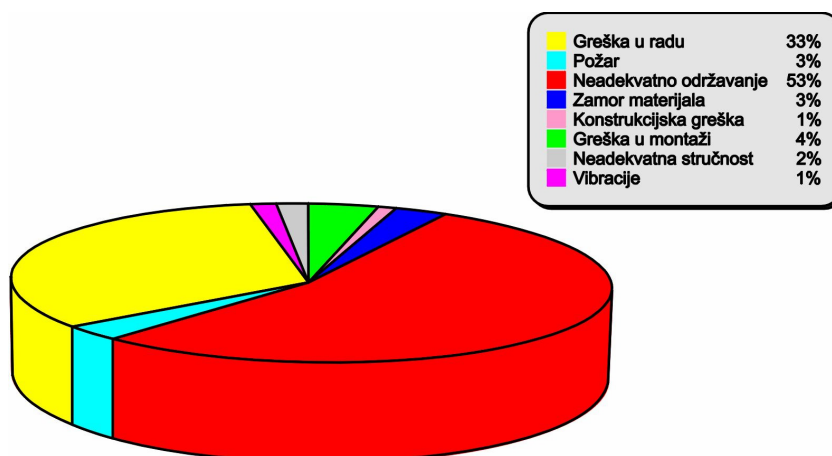
*Slika 58. Kvarovi kod srednjookretnih i brzookretnih motora*

Podaci ukazuju na realnost očekivanja kvara dizelskih generatora, osobito zbog njihovog permanentnog rada, te na čimbenike na koje treba obratiti pozornost kod definiranja optimalnog stupnja zalihosti sustava za proizvodnju električne energije na brodu.

#### 5.4.4. Baza podataka NK<sup>23</sup>

Klasifikacijska ustanova NK [60] izvršila je, u razdoblju od 1993. do 1998. godine vrlo opsežno istraživanje na 300 brodova, na kojima je prijavljeno 499 većih kvarova, zbog kojih je brod ostao bez, ili sa znatno reduciranim porivom. Kvarovi su klasificirani u jednu od osam grupa (Slika 59.), a osobito veliki postotak otpada na kvarove izazvane neadekvatnim održavanjem (53%).

Ukoliko se navedeni podaci sistematiziraju prema uzroku kvara i mjestu nastanka kvara (strojnom uređaju), moguće je izraditi dijagram (Slika 60.), koji zorno prikazuje nastale kvarove u strojnom kompleksu.



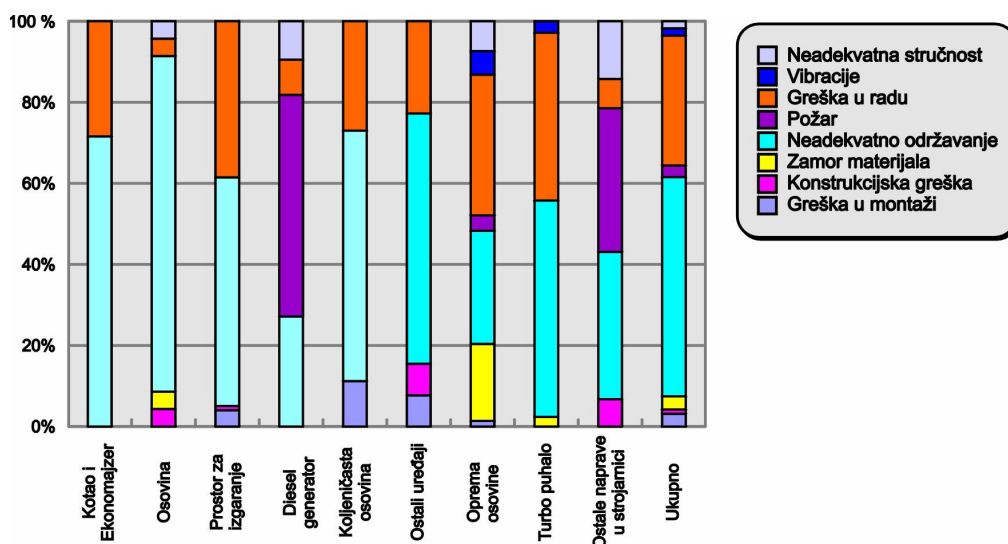
Slika 59. Uzroci kvarova u brodskom strojnom kompleksu

U praksi se često događa da kvar nastupa zbog slučajnih uzroka. Ukoliko se takve kvarove želi uzeti u obzir kod analize pouzdanosti sustava, potrebno je kombinirati tzv. normalnu i eksponencijalnu razdiobu. Ako, npr. funkcioniranje sustava ovisi o dvije komponente, od kojih jedna otkazuje zbog slučajnog kvara, a druga zbog vremenskog kvara, obje komponente rade nezavisno jedna od druge, a do kvara sustava dolazi kada otkáže jedna od njih. Pouzdanost se tada prikazuje kao umnožak pouzdanosti njihovih komponenti.

Pritom se najbolje koristiti tzv. Weibull–ovom razdiobom, koja pokriva većinu slučajeva pouzdanosti u praksi.

<sup>23</sup> NK – Nippon Kaiji Kyokai





Slika 60. Kvarovi u brodskom strojnom kompleksu

Ukoliko funkcija učestalosti kvara  $\lambda(t)$  ima oblik:

$$\lambda(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1},$$

gdje je:

$\eta$  - parametar mjerila,

$\beta$  - oblici funkcije kvara,

funkcija kvara poprimit će za različite parametra  $\beta$  različite vrijednosti (Slika 61.), pa se izborom parametra  $\beta$  može postići da funkcija gustoće kvarova bude rastuća ili padajuća. To će naravno utjecati i na funkciju gustoće vjerojatnosti kvarova  $f(t)$  (Slika 62).

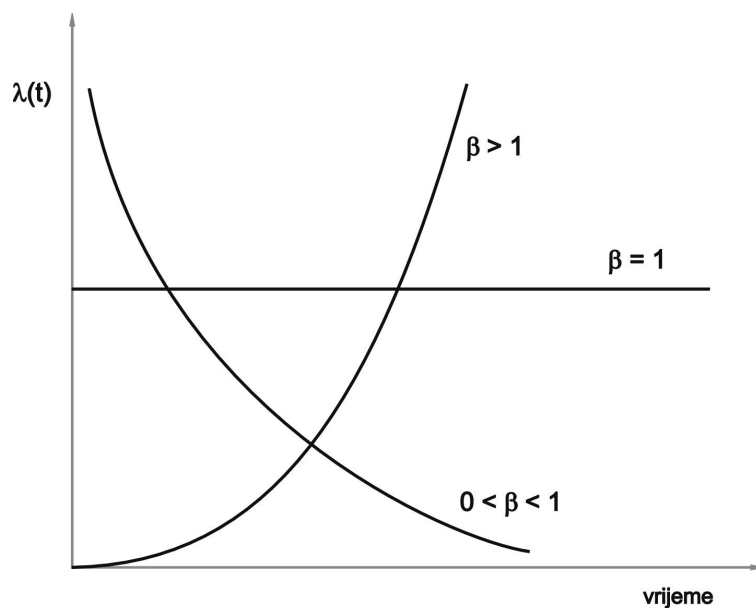
Uzevši u obzir da je funkcija pouzdanosti  $R$  za Weibull–ovu razdiobu:

$$R(t, \eta, \beta) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta},$$

slijedi za:

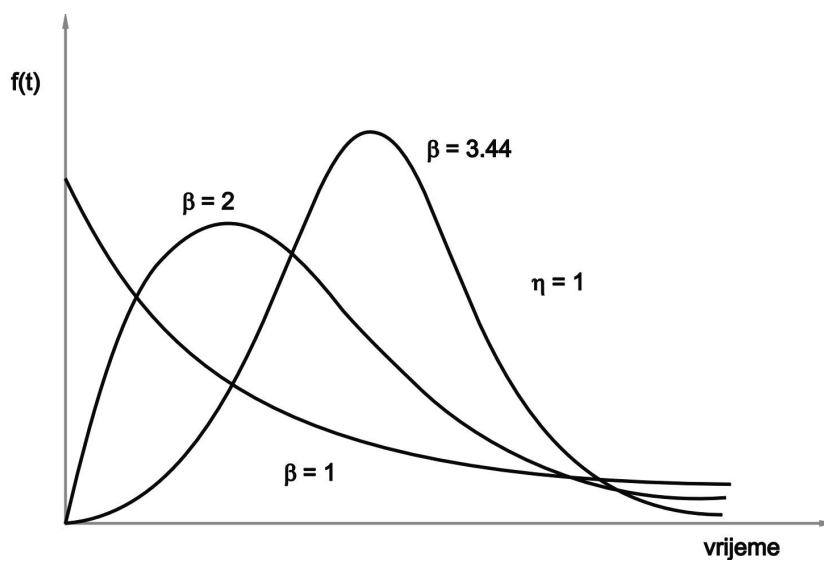
$\beta = 1$  eksponencijalna razdioba,

$\beta = 3,44$  normalna razdioba.



Slika 61. Učestalost kvarova u ovisnosti od  $\beta$

Pritom se vjerojatnost kvarova, koji nastaju pod utjecajem slučaja i istrošenosti, opisuje Weibull–ovom razdiobom  $\beta$ , koja varira od 1 do 3,44 i određuje oblik razdiobe.



Slika 62. Funkcija gustoće kvara u ovisnosti o  $\beta$

Sa supstitucijom  $t = \eta$ , koju je moguće postaviti za kumulativnu razdiobu, moguće je napisati jednadžbu dvokomponentnog sustava razdiobe:

$$F(t = \eta) = 1 - e^{-1} = 0,632 .$$

Vrijednost funkcije kumulativne raspodjele  $F(t) = 0,632$  ukazuje da je kumulativna vjerojatnost promatrane pojave jednaka 63,2% (ako se radi o neispravnostima). Odgovarajuća pouzdanost tada iznosi 36,8%.

## **6. UTJECAJ ELEKTRIČNE ENERGIJE NA POUZDANOST I SIGURNOST BRODSKOG POGONA**

Brodski elektroenergetski sustav raspodjeljuje energiju trošilima uz maksimalnu sigurnost i djelotvornost, te uz konstantni napon i frekvenciju. Da bi se osigurao zadovoljavajući rad, potrebno je uvesti kontinuiranu mjeru funkcionalnosti sustava, koja će ukazivati na degradaciju bilo kojeg zahtjeva potrošača.

Za potrebe daljnje analize definira se brodski elektroenergetski proces primarne brodske električne mreže kao dio broskog energetskeg procesa, kojim se postiže proizvodnja, prijenos i transport električne energije trošilima priključenim na primarnu brodsku mrežu.

Kao izvori električne energije najčešće se koriste generatori izmjenične struje, pokretani dizelskim motorom, ponekad u kombinacijama s turbinama (parne ili plinske turbine) ili pogonjeni osovinom glavnog motora. Generatori s glavnom rasklopnom pločom sačinjavaju električnu centralu, čija se električna energija dovodi do pojedinih trošila sustavom razvoda. Osnovne karakteristike broskog elektroenergetskog sustava, a koje ga razlikuju od kopnenih elektroenergetskih sustava, proizlaze iz propisa klasifikacijskih ustanova, tehničko-tehnoloških karakteristika, autonomnosti, veličine električnih sustava i uvjeta okoline.

Klasifikacijska društva svoje propise definiraju na osnovi međunarodnih propisa, međutim, usporedbom propisa raznih srodnih registara, može se zaključiti da se propisi ipak razlikuju u pojedinim područjima. Uz propise, klasifikacijska društva pri gradnji broda postavljaju zahtjeve da oprema ili pojedini njeni dijelovi, odgovaraju preporukama, pravilima i standardima pojedinih nacionalnih ili međunarodnih udruženja ili komiteta. U svojim pravilima, klasifikacijska ustanova određuje koji strojevi ili uređaji podliježu nadzoru za vrijeme proizvodnje i tvorničkog ispitivanja. O pozitivnom nalazu, odnosno ispitivanju, izdaju se odgovarajuće svjedodžbe.

Prema postojećim tehničkim propisima, na svakom prekomorskome brodu moraju biti, pored izvora u nuždi, instalirana najmanje dva glavna izvora električne energije, koji bez izuzetaka, moraju biti pokretani svaki s vlastitim pogonom (motor). Brod mora posjedovati sklop pričuvnih dijelova u opsegu jednog motora, a budući da se ti rezervni dijelovi tijekom eksploatacije broda adekvatno ne održavaju (čak i zagube), pa posada broda kod kvara može imati velikih poteškoća, brodovlasnici često ugrađuju tri pomoćna motora sa generatorima, pa tada po propisima nemaju obvezu na pričuvne dijelove pomoćnih motora i generatora. Turbogenerator i osovinski generator nisu uračunati u navedene izvore električne energije, pa mogu poslužiti samo kao

dopunski izvor. Snaga pogonskih generatora mora biti odabrana tako da kod ispada jednog generatora, napajanje svih važnih trošila u pogonu za vrijeme plovidbe, u manevriranju, u luci, kod požara, prodora vode i slično, mora biti osigurano preostalim glavnim izvorom električne energije.

Pod autonomnošću električnog sustava, podrazumijeva se njegova sposobnost za rad u uvjetima neovisnosti od drugih sustava, a pod veličinom sustava definira se njegova ukupno instalirana snaga. Autonomnost električnog sustava zahtijeva veliku pozornost kod izrade bilance električne energije. Proračunom bilance ukupnih potreba za električnom energijom, uzimajući u obzir faktor istovremenosti pojedinih grupa trošila, određuje se snaga dizelgeneratorske jedinice. Neadekvatno dimenzioniranje izvora električne energije na brodu, može imati odlučujući utjecaj na mogućnost ispunjenja tehnoloških parametara broda, ali i veliki utjecaj na investicijske i eksploatacijske troškove, stoga autonomnost zahtijeva veću pouzdanost električnih uređaja i veću raspoloživost električnog sustava. Pouzdanost se veže za kvalitetu uređaja, a raspoloživost uz zalihost uređaja i organizaciju otklanjanja kvarova.

Uvjeti okoline na brodu su varijabilni, pa su sva postrojenja i uređaji na brodu izloženi težim uvjetima rada od većine sustava na kopnu. Plovidbom broda mijenjaju se klimatske zone ovisno o geografskom području i godišnjem dobu, stoga svi sustavi na brodu moraju odgovarati propisima koji se odnose na temperature, vlažnosti, vibracije i nagib broda uslijed nevremena. Svi sustavi i uređaji ugrađeni na brod, moraju biti izvedeni tako da u najtežim uvjetima okoline pouzdano rade, pa nadležni registri izdaju certifikat da je neki uređaj građen za brodske uvjete i da se može ugraditi na brod.

## 6.1. Dizelski generator

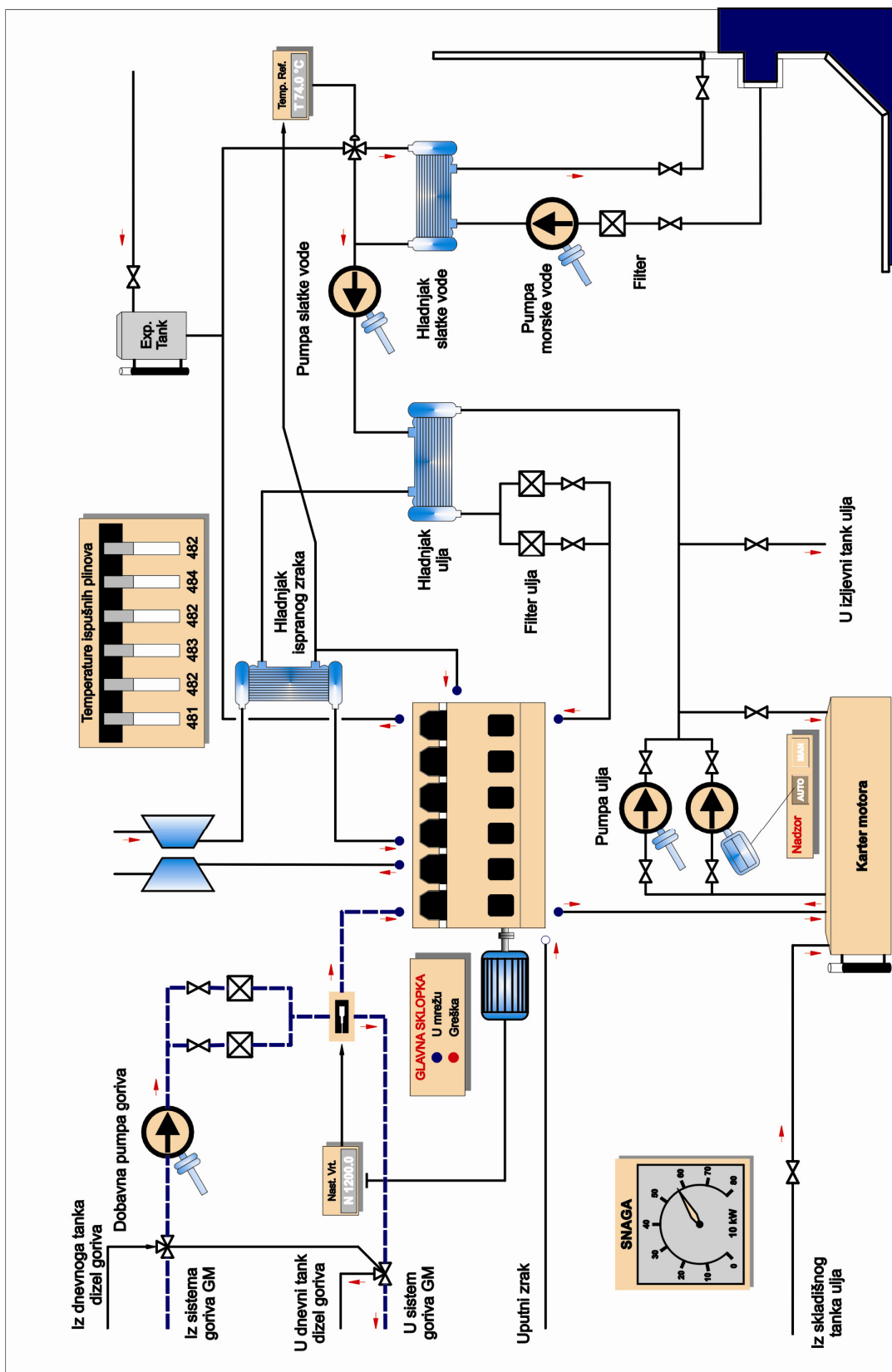
Dizelski generatori se ugrađuju na brod kao samostalne jedinice i proizvode električnu energiju za potrebe broda i neovisni su od drugih sustava na brodu. Međutim, dizelgeneratorska jedinica ne može funkcionirati bez povezivanja s ostalim brodskim pomoćnim sustavima, s kojima je u uskoj međuovisnosti tijekom eksploatacije.

Integracija pojedinih jedinica dizelskih generatora (Slika 63.), započinje povezivanjem na zajedničke službe motora i generatora, a u posrednoj je vezi sa sustavima porivnog stroja. U današnje je vrijeme na suvremenim brodovima, sustav teškog goriva većinom definiran kao jedinstveni sustav, pa porivni motori i generatori rade na isto gorivo i dobivljaju gorivo iz zajedničkog sustava napajanja. Koncept univerzalnog sustava goriva je temelj za znatne uštede i jednostavniji je glede održavanja i manipulacije. Sustav goriva je pod tlakom i sastoji se od dobavnih i cirkulacijskih pumpi goriva, zagrijača i opreme za kontrolu viskoziteta. Da bi se dizelski motor mogao, u bilo kojem trenutku uputiti s teškim gorivom, cirkulacijske pumpe goriva (zagrijanog) i rashladne vode uvijek rade, a pumpa pretpodmazivanja povremeno.

Generatorsko se postrojenje može alternativno opskrbljivati promjenjivim sustavom goriva (lakog ili teškog dizelskog goriva), preko daljinski kontroliranih, pneumatskih troputnih ventila, pri čemu je promjena goriva za svaki generator neovisna. Odvojeni sustav goriva za svaki generator ima prednosti, ukoliko se motor mora zaustaviti duže vrijeme radi većih popravaka ili se gorivo porivnog motora mora promijeniti s teškog na dizelsko gorivo, pa pomoćni motori mogu i dalje raditi s teškim gorivom.

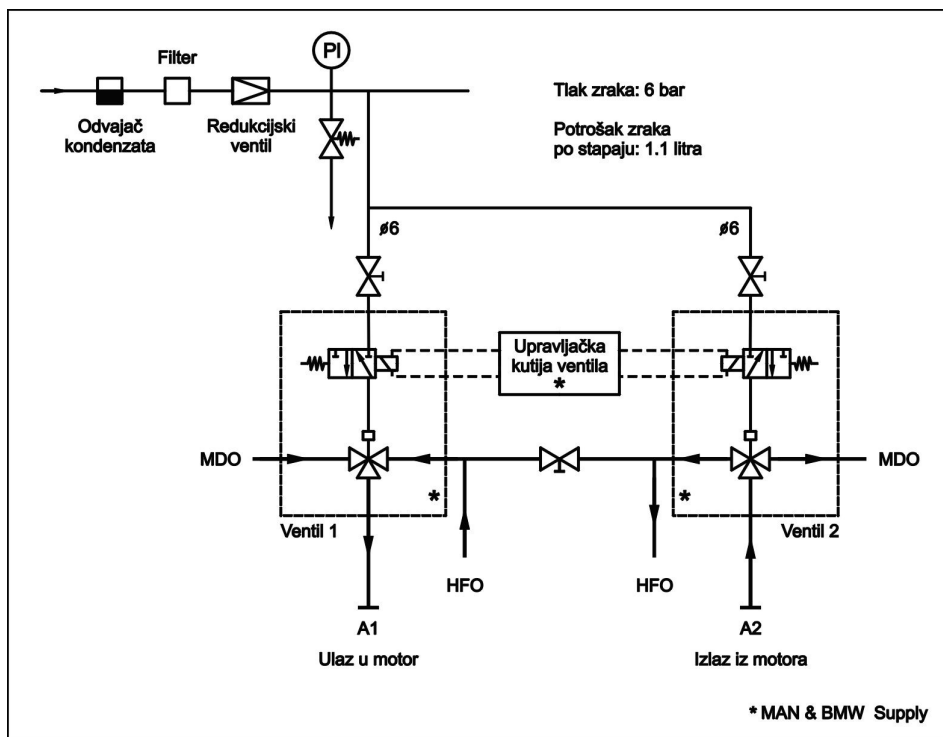
Ukoliko nestane struje, pomoćni se motori mogu uputiti na dizelsko gorivo kada:

- se gorivo dobavlja dodatnom pumpom dizelskog goriva, koja se može pokretati pneumatski ili električno, a ukoliko se pokreće električno, pumpa mora biti spojena na ploču s prekidačima za nuždu;
- motor ima ugrađenu dodatnu (buster) pumpu, koja se može koristiti ako minimalna razina u servisnom tanku dizelskog goriva nije viša od 1 m ispod razine ugrađene pumpe, pri čemu razina servisnog tanka ispod motora može izazvati probleme s vakuumom u sustavu;
- ukoliko pumpa nije predviđena može se iznad motora ugraditi gravitacijski tank (100 do 200 l);
- nije dostupna niti jedna pumpa, motor je moguće uputiti na dizelsko gorivo, ukoliko je tank smješten najmanje osam metara iznad motora.



Slika 63. Osnovni proces dizelskog generatora

Jednostavni sustav promjene goriva dizelskog motora (Slika 64.), sastoji se od dva troputna ventila  $V_1$  i  $V_2$  s elektro/pneumatski upravljanim razvodnikom s povratom pomoću opruge.

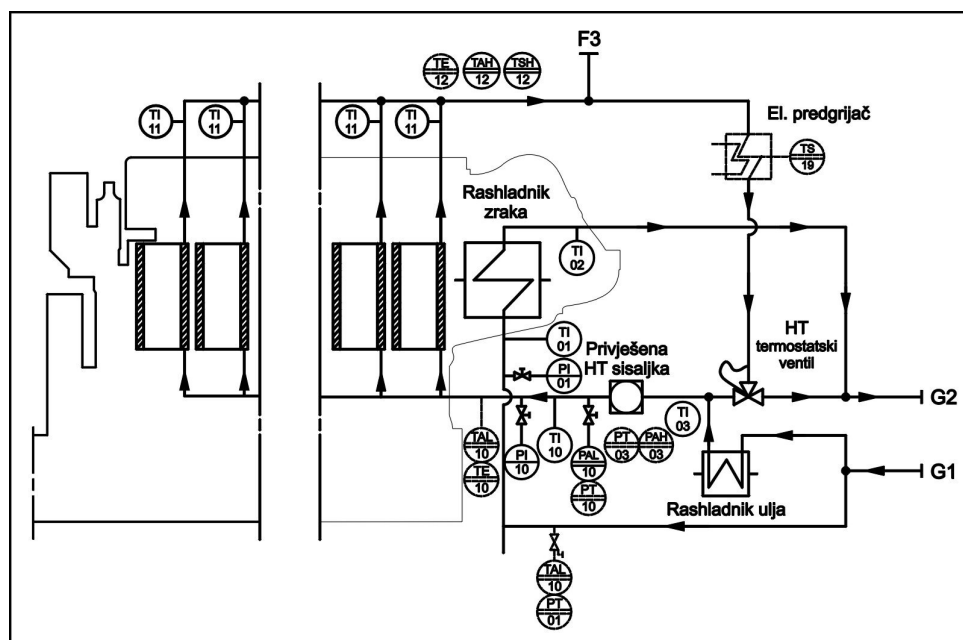


*Slika 64. Sustav za promjenu goriva*

Sustav omogućava fleksibilan odabir MDO i HFO rada motora pri bilo kojem opterećenju i daje veliku prednost ispred sustava individualnog odabira goriva za rad motora. Da bi se osigurala recirkulacija u cjevovodu teškog goriva, kad motor radi na dizelsko gorivo, zaobilazni (by pass) ventil mora biti ugrađen između ulaznog ventila  $V_1$  i izlaznog ventila  $V_2$  na svakom dizelskom motoru. U slučaju nestanka električne struje ili kada nema napona, ventili za promjenu goriva bit će isključeni i automatski će zauzeti položaj za dizelsko gorivo zbog ugrađene povratne opruge.

Rashladni sustav izveden je s dva priрубna spoja na vanjski centralni niskotemperaturni rashladni sustav slatke vode (Slika 65). Motor je opremljen samokontrolirajućim visokotemperaturnim vodenim krugom za hlađenje košuljice i glave cilindra, pa motor na strani rashladne vode zahtjeva samo slatkovodni rashladni sustav kao samostalnu jedinicu s niskim troškovima instalacije i kružnim indirektnim hlađenjem, zbog mogućnosti održavanja visokih temperatura rashladne vode, čime se postiže bolji i ekonomičniji rad motora. Rashladnik zraka za prednabijanje i rashladnik ulja za podmazivanje, paralelno su smješteni kako bi imali najmanju moguću ulaznu temperaturu rashladne vode za oba rashladnika.





G<sub>1</sub> – ulaz slatke vode niske temperature

G<sub>2</sub> – izlaz slatke vode niske temperature

F<sub>3</sub> – odvod prema ekspanzijskom tanku

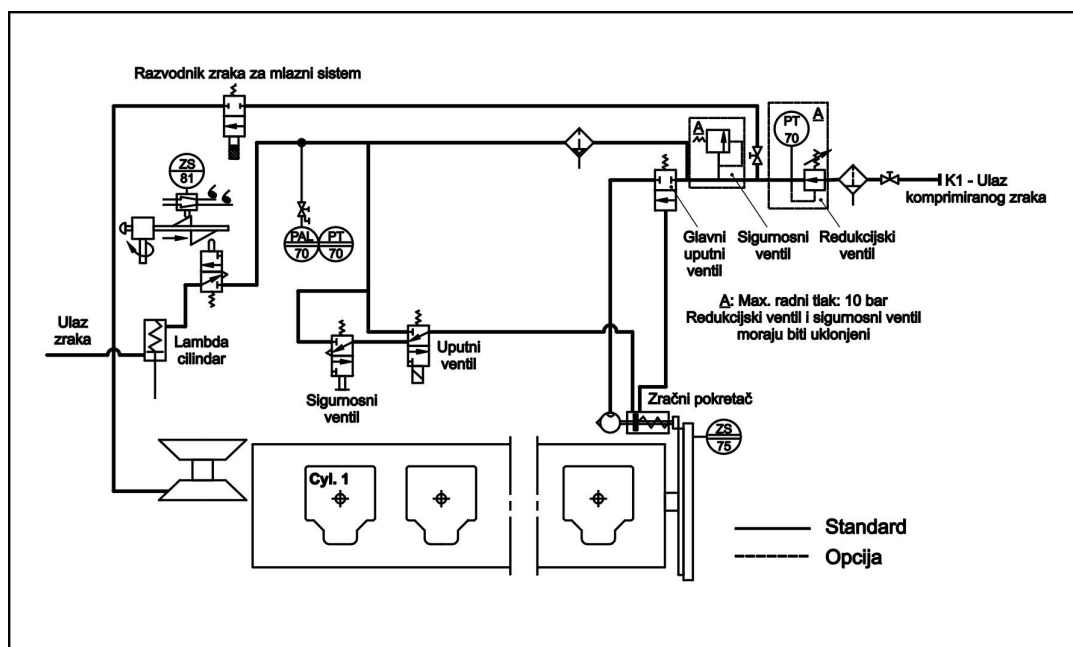
Slika 65. Rashladni sustav dizelskog generatora

VT krug se hladi vodom iz niskotemperaturnog kruga rashladnika ulja za podmazivanje. Time se količina rashladne vode kroz sustav hlađenja uvijek podešava opterećenju motora. Pomoćni motori imaju većinom ugrađenu privješenu pumpu za cirkulaciju rashladne vode konstantne temperature. Za protok manje ili veće količine rashladne vode, ugrađuju se termostatski ventili koji se reguliraju u ovisnosti o opterećenju motora.

Sustav uputnog zraka motora sastoji se od sustava kontrole upućivanja i sigurnosnog sustava. Komprimirani zrak se dovodi iz boce uputnog zraka (30 bar) i u redukcijском ventilu reducira na 7 do 9 bara (Slika 66.).

Motor se upućuje ugrađenim zračnim pokretačem, koji se sastoji od zračnog motora sa zupčanim prijenosom, sigurnosnom spojkom i pogonskom osovinom. Zračni cilindar aktivira se električno s pneumatskim razvodnikom i magnetski upravljanim ventilom. Razvodnik se može aktivirati ručno iz startne kutije na motoru ili se njime može daljinski upravljati, ručno ili automatski. Sustav je opremljen uputnim ventilom u nuždi, koji omogućava ručno aktiviranje zračnog cilindra u slučaju nestanka struje.

Kada brzina vrtnje motora dosegne radnu brzinu vrtnje (započne izgaranje), uputni ventil se preko zračnog prekidača zaustavlja.



K<sub>1</sub> – ulaz komprimiranog zraka.

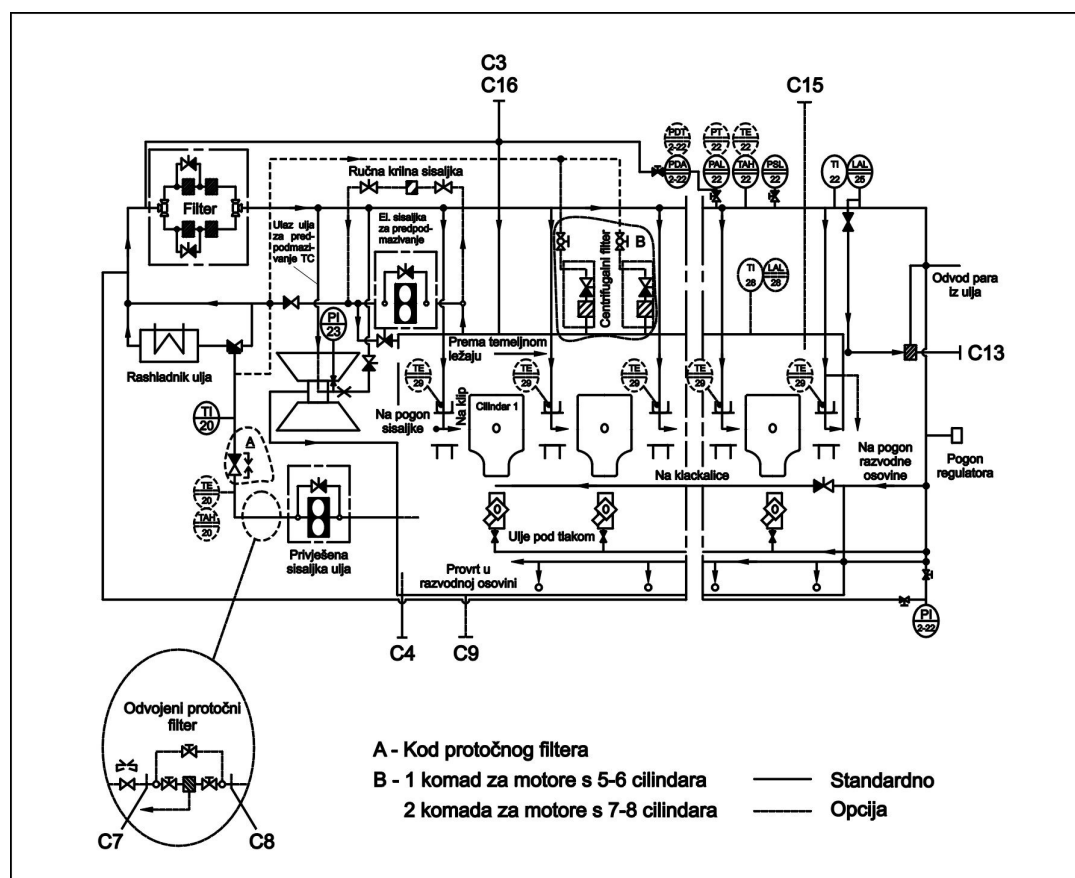
Slika 66. Sustav komprimiranog zraka

Motor je opremljen s pneumatsko-mehaničkim uređajem za ograničavanje prevelike brzine, koji se uključuje kod prelaska maksimalno dozvoljenih brzina vrtnje, a pogoni ga pumpa ulja za podmazivanje preko elastične spojke.

Kod prekoračenja brzine vrtnje, uređaj će aktivirati pneumatsko upravljani "stop cilindar" koji će smanjiti indeks goriva na "nulu" i zaustaviti motor.

Sustav podmazivanja uljem temelji se na podmazivanju s mokrim karterom. Svi pokretni dijelovi motora podmazuju se uljem, koje cirkulira pod tlakom u zatvorenom ugrađenom sustavu (Slika 67.), koji se sastoji od privješene pumpe ulja za podmazivanje, rashladnika ulja, termostatskog ventila, filtra ulja i pumpe ulja za pretpodmazivanje.

Pumpa ulja za pretpodmazivanje većinom ima vremenski relej, pomoću kojeg ukopčava i iskopčava rad pumpe. Pumpa radi samo ako je motor u pričuvi, kako bi u svakom momentu bio podmazan i spreman za automatsko startanje i postizavanja optimalnog opterećenja.



- C<sub>3</sub> – ulje za podmazivanje iz separatora,
- C<sub>4</sub> – ulje za podmazivanje prema separatoru,
- C<sub>7</sub> – ulje za podmazivanje iz odvojenog protočnog filtera,
- C<sub>8</sub> – ulje za podmazivanje prema odvojenom filteru,
- C<sub>9</sub> – povrat ulja iz protočnog filtera,
- C<sub>13</sub> – odvod para iz ulja,
- C<sub>15</sub> – preljev ulja za podmazivanje,
- C<sub>16</sub> – dobava ulja za podmazivanje.

Slika 67. Podmazivanje pomoćnih motora

Glavni parametri pomoćnog motora za pokretanje generatora su brzina vrtnje, karakteristika promjenljivog opterećenja generatora s priključnim trošilima, stalna brzina vrtnje neovisna o snazi, prosječnom efektivnom tlaku ili okretnom momentu motora za određeni položaj regulatora. Zbog zahtjeva za stabilnim naponom, motor održava (u dopuštenim granicama) stalnu nominalnu brzinu vrtnje pri svim opterećenjima generatora, od praznog hoda do punog opterećenja.

### 6.1.1. Utjecaj dizelskog generatora na sigurnost brodskog poriva

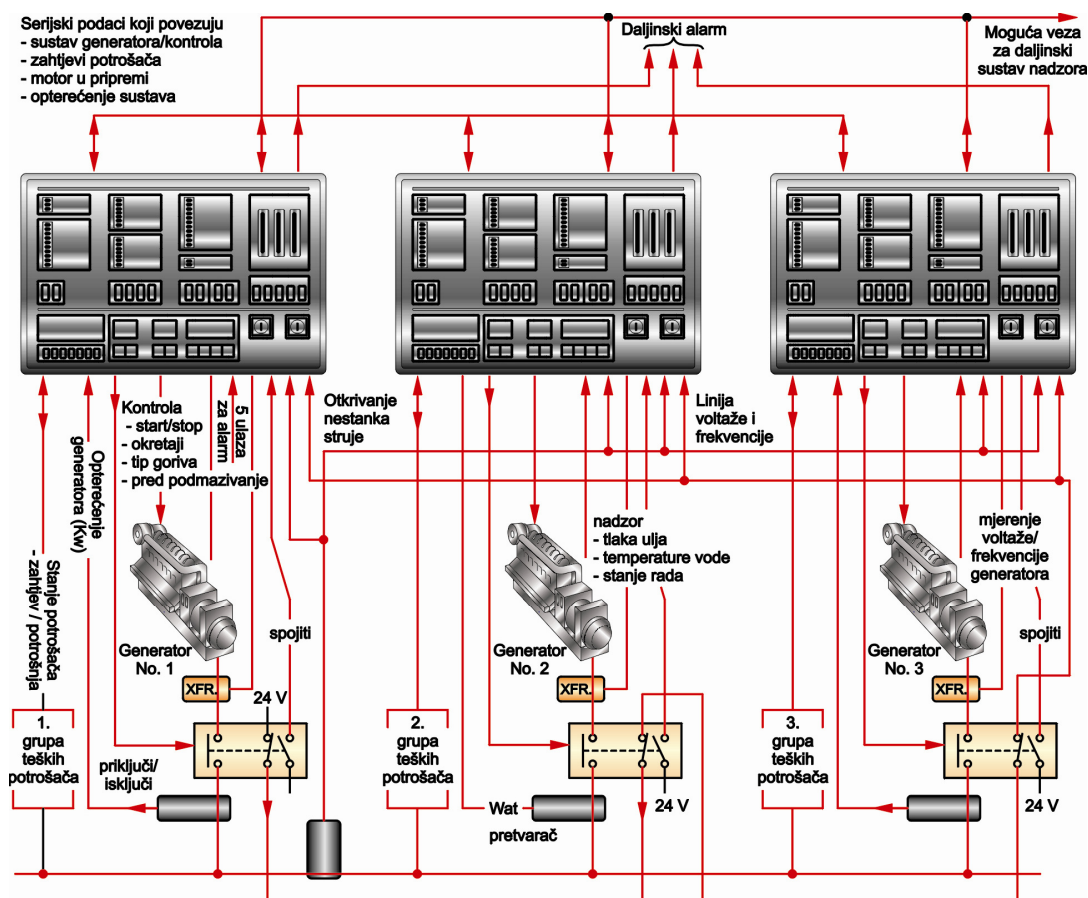
Jedinica kontrole generatora omogućava kompletno nadgledanje, alarmiranje i upravljanje radom pojedinih generatora (Slika 68.). Jedinice mogu komunicirati međusobno, te omogućiti potpuno automatski sustav upravljanja strujom za generatorska postrojenja s više generatora. Svaka jedinica ima ploču, koja prikazuje status jedinice i generatora, koji omogućuje korisniku izvođenje određenih i kontrolnih operacija. Operacije uključuju odabir "Master/Standby mod" i metodu raspodjele opterećenja, što predstavlja osnovne operacijske funkcije kontrolne jedinice i njezinog dizelskog generatora, kao i Start/Stop/Spojiti/Isključiti, što je funkcija ručne kontrole dizelskog motora i generatora.

Svi brodski pogoni, kao i sam poriv broda, ovise o besprijekornom radu sustava dizelskih generatora, odnosno o pouzdanosti dizelskog generatora. Nažalost pouzdanost samog dizelskog generatora je često upitna zbog velikog broja konstrukcijskih komponenti u serijskoj ovisnosti. Primjera radi, treba istaknuti da je samo turbopuhalo sastavljeno od 82 elementa, dok sam motor ima daleko više elemenata (osovine, ležajevi, ventili, stapovi, glave motora, brtve itd.). Svaka od ovih komponenti može prouzrokovati ispadanje agregata iz rada.

Na strojarskom simulatoru izrađen je scenarij simulacije rada dizelskog generatora, s drugim dizelskim generatorom u pričuvu (Slika 69.). Ispad generatora simuliran je neočekivanim preopterećenjem, koje mogu izazvati bilo palubna vitla ili cirkulacijske pumpe tereta na tankerima. Kada nastupi preopterećenje brodske mreže, zbog uključivanja prevelikih snaga trošila ili ispada generatora iz pogona radi njegovog preopterećenja ili kvara, automatski se pokreće (start program) pričuvni agregat, te se selektivno i postupno uključuje na sabirnice glavne sklopne ploče uz prethodnu automatsku regulaciju napona, frekvencije i sinkronizaciju.

Budući da svi klasifikacijski zavodi zahtijevaju i ručno sinkroniziranje bez obzira na stupanj automatizacije, predviđa se ručna sinkronizacija, uključivanje na mrežu i raspodjela tereta s glavne sklopne ploče. Na glavnoj sklopnoj ploči ujedno se nadziru vrijednosti napona, struje i frekvencije, a granične vrijednosti dopuštenih iznosa najmanjeg napona i najveće struje signaliziraju se alarmom.

Automatsko sinkroniziranje novog generatora, potrebno je također ukoliko nema dovoljno raspoložive pričuvne snage za priključak na mrežu trošila velike snage (najčešće veći elektromotori). Prije njihovog priključivanja, utvrdi se podatak o raspoloživoj snazi i ukoliko ona nije dovoljna, automatski se starta dodatni agregat, generator se sinkronizira na mrežu i tek tada uključe motori.



Slika 68. Sustav upravljanja proizvodnjom el. energije

Kada su u normalnom pogonu, u paralelni rad uključeni svi raspoloživi generatori, a jedan od njih ispadne iz pogona, mora se onemogućiti preopterećenje preostalih generatora, koje bi izazvalo i njihovo ispadanje iz mreže. To se izvodi automatskim isključivanjem manje važnih trošila, kako bi se omogućilo sigurno napajanje kormilarških strojeva i drugih sustava važnih za sigurnost poriva broda. Kod smanjenja opterećenja brodske mreže, pri čemu bi se raspoloživa pričuvna snaga nepotrebno povećala, pojedini agregati se automatski stavljaju izvan pogona i zaustavljaju (stop program). Na taj se način izbjegava da dva dizelska agregata rade s malim opterećenjem, pod nepovoljnim pogonskim uvjetima i s malim stupnjem iskoristivosti. Time se ujedno skraćuje vrijeme rada agregata i produžuje vremenski razmak između obveznih servisa.

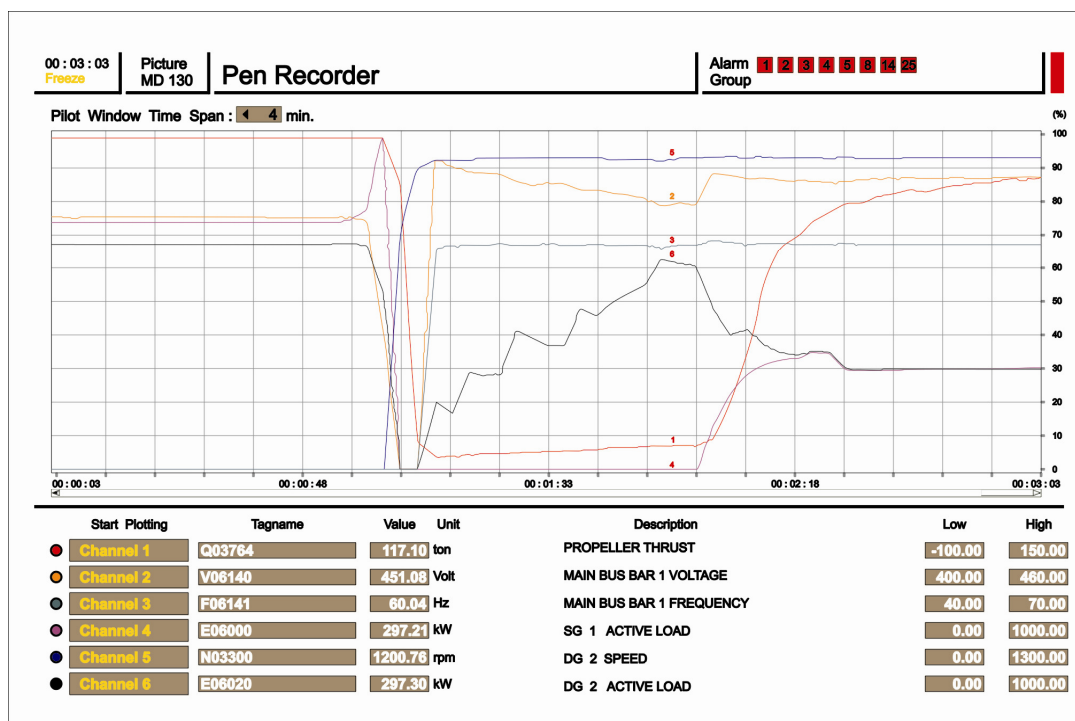
Raspodjela opterećenja u paralelnom radu sinkronih generatora različito se ostvaruje za radnu (djelatnu) snagu i za praznu (jalovu) snagu. Pri toj je raspodjeli potrebno održavati u stacionarnom stanju približno konstantnu frekvenciju i napon brodske mreže.

Radna energija pojedinog generatora u paralelnom radu, ovisi o radnoj snazi koju pogonski motor prenosi na osovinu generatora i mijenja se regulatorom brzine vrtnje pogonskog motora. Proporcionalnom karakteristikom regulatora brzine vrtnje ostvaruje se ovisnost zakretnog momenta o brzini vrtnje, budući da je izlaz regulatora proporcionalan dovodu primarne energije (količini ubrizganog goriva), a to znači da je proporcionalan zaokretnom momentu pogonskog stroja (Slika 63). Motor koji služi kao primarni pokretač generatora, mora zbog zahtjeva za stabilnim naponom održavati (u dopuštenim granicama) stalnu (nominalnu) brzinu vrtnje pri svim opterećenjima generatora, od praznog hoda do punog opterećenja. Tipični opseg regulacije brzine vrtnje motora je  $\pm 10\%$  od nominalne brzine vrtnje, a točnost stabilizacije mora biti u granicama  $\pm 0,5\%$  od postavljenog.

Dizelski motori, kojima se pogone sinkroni generatori u paralelnom radu, imaju regulatore takvih karakteristika da im s opterećenjem brzina vrtnje opada približno 4%. S obzirom na ovako malu promjenu brzine vrtnje u čitavom području opterećenja, te uz relativno visoku iskoristivosti generatora ( $\approx 95\%$ ), slijedi da su zakretni momenti dizelskog motora proporcionalni korisnoj snazi generatora. Time se postiže jednolika raspodjela radne snage na paralelno spojene agregate, ukoliko su jednake brzine vrtnje praznog hoda i nagibi karakteristika brzina vrtnje u ovisnosti o zakretnom momentu svih motora. Međutim, zbog temperaturne razlike, trošenja i starenja dijelova pogonskog motora, kao i eventualne potrebe mijenjanja brzine vrtnje praznog hoda za sinkronizaciju generatora, potrebna je nadređena regulacija raspodjele djelatne snage na agregate u paralelnom radu. Pri tome uređaj za automatsku raspodjelu opterećenja mora djelovati tako da ne isključi generator kod kratkotrajne promjene opterećenja. Konstantna frekvencija brodske mreže također se postiže nadređenom regulacijom frekvencije.

U određenim režimima rada mogu paralelno raditi i različiti generatori (npr. utilizacijski turbogenerator, osovinski generator i dizelski generator). U tom je slučaju poželjno da se snaga raspodjeli ovisno o troškovima proizvodnje električne energije. Da bi se to postiglo potrebna je regulacijska struktura, koja na osnovi utjecajnih parametara daje optimum.

Raspodjela jalove snage ostvaruje se regulacijom napona generatora promjenom uzbudne struje. Regulatori napona generatora uglavnom su podešeni na čvrstu zadanu veličinu, uz uvjet da je nagib karakteristike napona jalove struje konstantan u čitavom području, te da su namještene iste vrijednosti napona praznog hoda svih generatora. Time se postižu stabilne radne točke i jednake raspodjele jalove energije u paralelnom radu. Isti agregati, koji imaju jednake snage generatora, obično nemaju regulaciju raspodjele jalove snage.



Slika 69. Simulacija preopterećenja dizelskog generatora

Rezultati simulacije pokazuju da nakon alarma preopterećenja dolazi do ispada iz rada primarnog generatora. Dvije sekunde nakon ispada, uputio se dizelski generator u pripravnosti, a tijekom pet sekundi započeo je s radom tzv. pričuvni generator. U devet sekundi u mreži je agregat, koji nakon 21 sekunde počinje primati opterećenje, nakon čega slijedi sinkronizacija agregata br. 2. Analiza pojedinih stanja dobivenih rezultata simulacije, upućuje na razlog paralelnog rada dva agregata, do koga je došlo zbog povećane potrošnje električne energije. Jednaki rezultati simulacije dobiveni su za kvarove zbog neadekvatnog rada sustava ulja, rashladne vode, pogonskog goriva ili neispravnosti pojedinih dijelova samih agregata.

## 6.2. Osovinski generator

Polazeći od jednostavne činjenice da svako smanjenje potroška goriva, smanjuje ukupne troškove eksploatacije broda, vodeći proizvođači brodskih motora uspjeli su u posljednjem desetljeću, inovacijama na sporookretnim dizelskim motorima, smanjiti potrošnju goriva i pri tom povisiti njihov efektivni stupanj iskoristivosti na približno 54%. Smanjenjem brzine vrtnje izravno pokretnog brodskog vijka, poboljšava se njegov stupanj djelovanja, što predstavlja daljnje smanjenje troškova goriva.

U navedenom razdoblju, trofazni osovinski generatori, pokretani neposredno ili preko odgovarajućih prijenosa, porivnim dizelskim motorom na teško gorivo, proizvode energiju do 50% jeftinije nego konvencionalni dizelski generatori. Cijena električne energije proizvedene osovinskim generatorom, smanjuje se povećanjem cijene goriva, snage generatora i vremena rada tijekom godine. Osim navedenih prednosti, uporaba osovinskog generatora smanjuje radne sate dizelskog generatora, što predstavlja daljnju uštedu u održavanju, popravcima i nadzoru.

Potrošnja električne energije varira u različitim uvjetima eksploatacije broda, ovisno o brzini plovidbe, da li se plovi maksimalnom, ekonomskom ili smanjenom brzinom, da li se pristaje ili isplovljava, ukrcava ili iskrcava teret. Svrishodnost ugradnje osovinskog generatora i izbor najpovoljnije varijante, ovisit će o udjelu navedenih eksploatacijskih uvjeta broda, gdje se pod pojmom ekonomske brzine obično podrazumijeva brzina plovidbe uz najmanje troškove, što se najčešće poistovjećuje sa optimalnom potrošnjom goriva. Maksimalna se brzina uz korištenje osovinskog generatora ne može postići, budući da generator troši dio snage glavnog motora. Najčešće zadovoljava nešto manja brzina, koja se postiže maksimalnim (sporijim) okretanjem brodskog vijka, te brzinom vrtnje koju dopušta rad osovinskog generatora, a koji je ograničen maksimalnom trajnom dozvoljenom brzinom vrtnje i frekvencijom mreže (Tabela 6.).

Promjene napona i frekvencije nisu podjednako neugodne za sve brodske potrošače. Budući da osovinski generator smanjenjem brzine vrtnje podjednako smanjuje frekvenciju i napon, to kod asinkronih motora neće izazvati značajnije zagrijavanje, do koga bi došlo zbog prevelike struje magnetiziranja, kada bi motori radili sa smanjenom frekvencijom pri nominalnom naponu. Stoga odnos napona prema frekvenciji kod osovinskog generatora mora biti konstantan. Pri tome radni strojevi, koje pogone asinkroni motori, moraju postići dovoljan radni učinak i pri smanjenoj brzini vrtnje (centrifugalne pumpe).

Brzina broda se, zbog sigurnosti, mora smanjiti u plovidbi kanalima, ušćima rijeka, prolazima u magli itd. Kod nevremena se zbog naglih promjena opterećenja glavnog motora i izranjanja brodskog vijka javljaju velike promjene frekvencije brodske mreže koje se ne mogu tolerirati.



Tabela 6. Osovinski generatori ugrađeni na porivne strojeve s fiksnim brodskim vijkom

| <i>PTO tunelski uređaj</i>               | <b>SA</b>                                           | <b>BEZ</b>                      |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------|
|                                          | <i>uređaja konstantne brzine</i>                    |                                 |
| <b>Brzina generatora<br/>(okr./min.)</b> | 1000, 1200, 1500, 1800                              |                                 |
| <b>Snaga<br/>(kWe)</b>                   | 700<br>1200<br>1800<br>Veće snage<br>prema zahtjevu | za ispunjenje zahtjeva<br>broda |

Pri vožnji uz veliku brzinu vrtnje, kakva je predviđena za rad osovinskog generatora, povećava se opasnost od prekoračenja maksimalno dopuštene brzine, što izaziva aktiviranje sustava zaštite motora (overspeed) i zaustavljanja porivnog stroja, a time ujedno i proizvodnje električne energije. Nestanak električne energije i prestanak pogona u takvim uvjetima ozbiljno ugrožava sigurnost broda. Navedeni razlozi zahtijevaju smanjenje brzine vrtnje, što znači uspostavljanje pogona dizelskim generatorima i isključivanje osovinskog generatora. Plovidba smanjenom brzinom, zbog sigurnosti, obično zahtijeva veću pouzdanost električnog sustava. To se postiže paralelnim radom dvaju ili više generatora, iako bi se potrošnja mogla pokrivati i manjim brojem jedinica. To se odnosi i na manevar uplovljavanja ili isplovljavanja, kada je zbog rada priteznih i sidrenih vitala potrebna veća rezervna snaga, a posebno kada se koristi pramčani propeler. Paralelan rad osovinskog i dizelskog generatora u takvim se situacijama vrlo rijetko prakticira, a najčešće je ekonomičnije smanjiti brzinu vrtnje glavnog motora, a energiju proizvoditi dizelskim generatorima. Uz to, uočeni su i određeni problemi tijekom dinamičkih poremećaja u manevriranju, posebno tijekom upravljanja u nuždi. Trajan paralelan rad osovinskog i dizelskog generatora upotrebljava se tijekom povećane potrošnje električne energije ili kada je jedan od pomoćnih strojeva u kvaru, a treba izvesti manevar, odnosno osigurati dovoljnu rezervnu snagu.

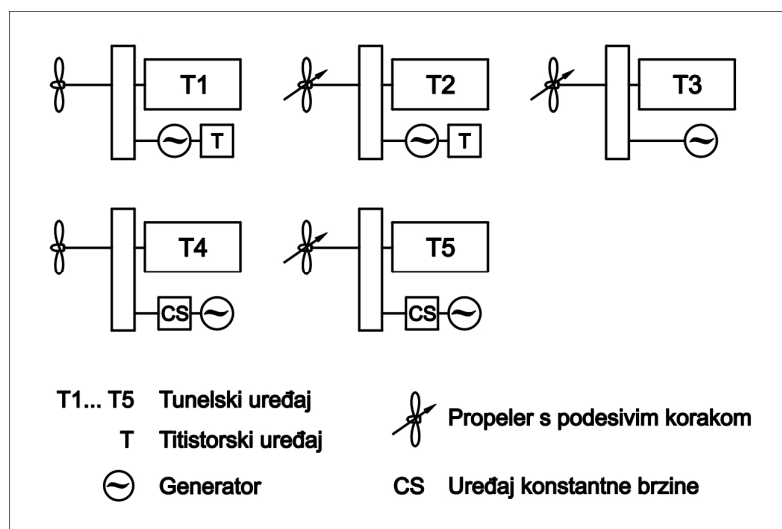
Ovisno o vrsti brodskog vijka, prekretnog ili fiksnog, brodska postrojenja zahtijevaju dva potpuno različita tipa osovinskih generatora. Brodovi s fiksnim vijkom, ne mogu održavati konstantnu brzinu vrtnje glavnog motora pri raznim brzinama, stoga osovinski generatori moraju biti opremljeni pretvaračem frekvencije, kako bi mogli održavati konstantnu frekvenciju električne mreže. Većinom se na osovinske generatore ugrađuje statički pretvarač frekvencije, s mehaničko-hidrostatskim prijenosnicima, kojim se bilo koja promjena brzine vrtnje porivnog motora automatski kompenzira, pa se osovinski generator uvijek

okreće konstantnom brzinom vrtnje. To se postiže tzv. planetarnim superponiranim prignonom, a kada je brod u dugoj plovidbi s jednolikim radom porivnog motora, navedeno superponiranje gotovo i ne postoji, budući da je osnovni prijenos planetarnog prigona konstruktivno podešen na srednju brzinu vrtnje motora, što predstavlja tzv. PTO<sup>24</sup> sustav. Do podjele snage dolazi kada porivni motor ima brzinu vrtnje veću ili manju od nazivne, pa se dio pogonske snage dovodi preko hidrostatike. Naraste li brzina iznad srednje brzine vrtnje, višak snage prenesen planetarnim prignonom, dovodi se preko hidrostatike natrag na pogonsku osovinu.

Novi sustavi osovinskih generatora su tijekom eksploatacije pokazali visoki stupanj kontrole brzine vrtnje, a to brzo i jednolično djelovanje važno je za svladavanje strogih zahtjeva na brodu kao što su :

- brzo manevriranje,
- longitudinalno ljuljanje po lošem vremenu,
- iznenadno rasterećenje,
- zatajenje upućivanja glavnog motora.

PTO sustav integriran je kao privješeni sustav na temeljnu ploču porivnog motora (Slika 70.), a mehanički prijenos snage izvodi se preko zupčanika (jednostupanjskih ili višestupanjskih prijenosnika) i spojke.



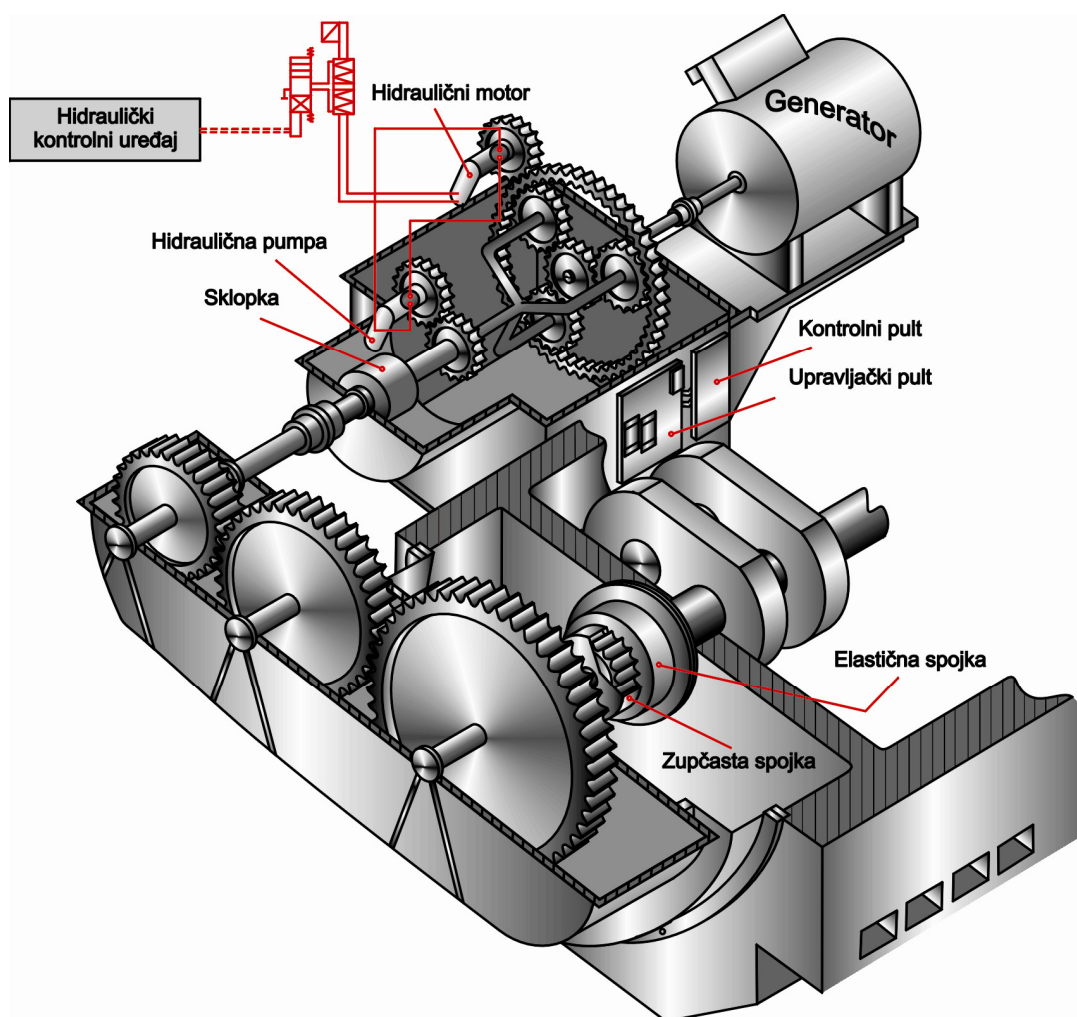
Slika 70. Mogućnost priključenja osovinskog generatora

Karakterističan način ugradnje i prijenosa predstavlja tzv. "Renk" sustav [82]. Jednostupanjski zupčasti prijenos s tri zupčanika (multiplikator) spojen je s

<sup>24</sup> PTO – Power Take Off

prirubnicom koljenastog vratila porivnog motora i jedinicom konstantne brzine (Slika 71.). Ulje za podmazivanje dovodi se iz sustava podmazivanja glavnog motora.

Jedinica konstantne frekvencije "Con Speed" sadržava epiciklički zupčasti prijenos kombiniran s hidrauličnim pogonom, koji djeluje na nosač planeta planetarnog prijenosa, pogonjen u oba smjera osiguravajući konstantni omjer promjenjivog prijenosa i time stabilnu brzinu vrtnje generatora.

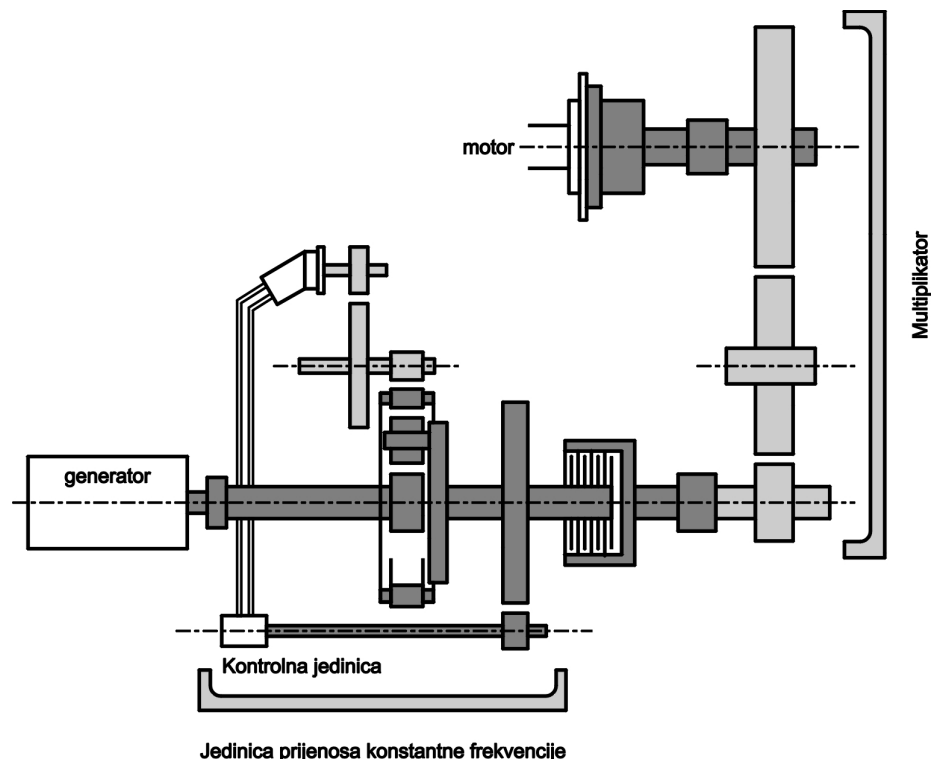


Slika 71. Sustav osovinskog generatora

Ukoliko se povećava brzina vrtnje porivnog stroja, povećava se i frekvencija protoka u generatoru i obrnuto. Osnovni omjer prijenosa epicikličkog zupčanika je podešen prema srednjoj vrijednosti brzine vrtnje glavnog motora (85 % max. brzine vrtnje). Kada brzina motora prijeđe zadanu srednju vrijednost, dodatna snaga se preko zupčanika predaje izlaznom vretenu hidraulične jedinice

(Slika 72.), koja će tu dodatnu energiju vratiti nazad, kada brzina motora padne ispod srednje vrijednosti.

Elektronska kontrolna jedinica određuje količinu protočnog ulja hidraulične pumpe, koja se pokreće pomoću zupčanog prijenosa. Prijenosni sustav je opremljen kočnicom koja blokira sustav zupčanika u ekonomičnom području rada i tada nema prijenosa energije hidrostatskom sustavu.



Slika 72. Jedinica prijenosa konstantne frekvencije

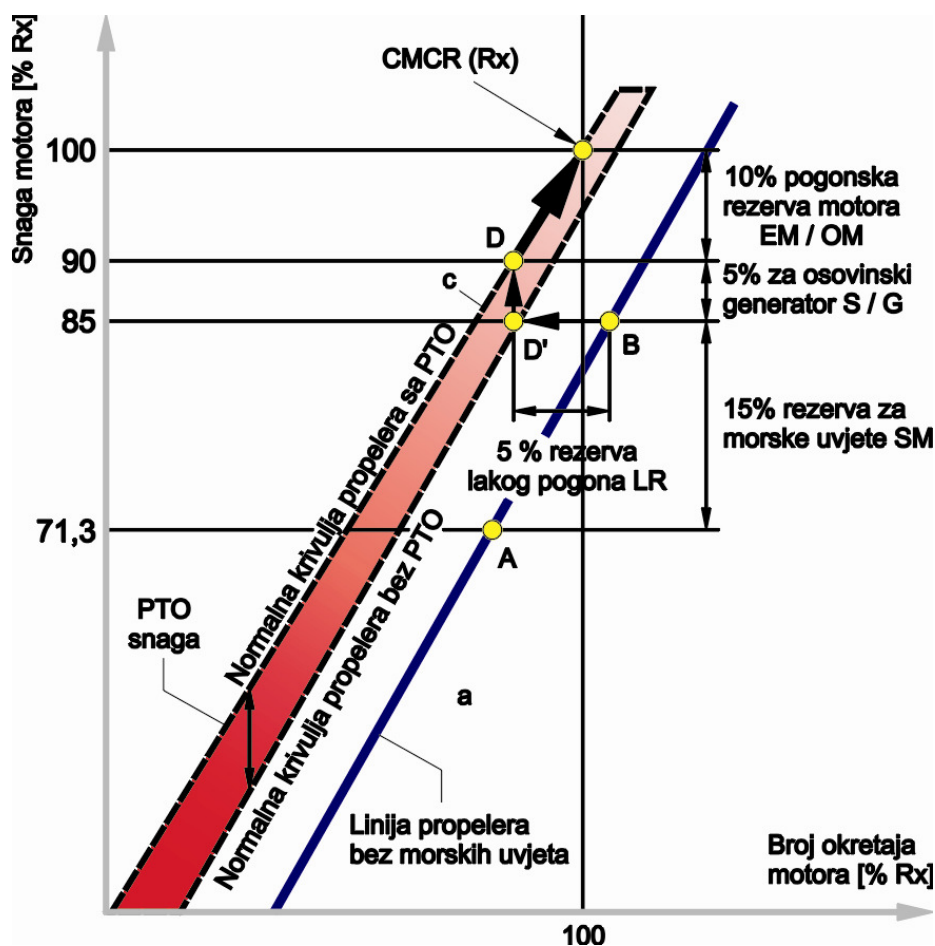
Snaga motora se prenosi preko fleksibilne i zupčaste spojke u zajedničkom kućištu, koje apsorbiraju radijalne i aksijalne sile i služe za ukopčavanje i iskopčavanje osovinskog generatora i motora.

Odabir potrebne snage samog uređaja osovinskog generatora (Slika 73.), vrši se na osnovi optimalne točke rada motora (D'), odnosno veličine unutar koje će glavni motor raditi u tzv. ekonomičnom području. Uz pretpostavku da generator troši za svoj pogon 5% nominalne snage motora, a uzevši u obzir maksimalnu snagu za pogon generatora, odabire se na pravcu rada porivnog motora s osovinskim generatorom (pravac C), radna točka CMCR. Pravac C i pravac brodskog vijka nisu paralelni zbog utjecaja snage osovinskog generatora na snagu motora.

Osovinski generator može raditi s punim opterećenjem u području između 70 do 100 % brzine vrtnje glavnog motora (Slika 74.), dok u području od 40 do

70 % brzine vrtnje motora radi linearno promjenljivo, dajući od 40 do 100 % snage.

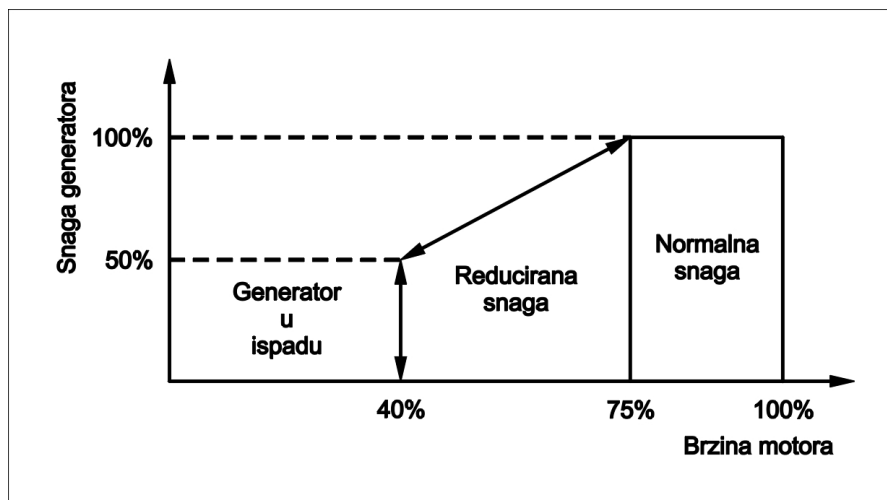
Da bi se izvršila ekonomska analiza opravdanosti ugradnje osovinskog generatora, potrebno je usporediti potrošnju goriva, ulja i stupanj iskoristivosti s klasičnim dizelskim generatorom.



Slika 73. Određivanje radnog područja porivnog motora i osovinskog generatora

Potrošnja goriva porivnog motora kreće se oko 167 g/kW, dok se potrošnja goriva pomoćnih motora kreće oko 204 g/kW. Iskoristivost PTO jedinice i "Con Speed" uređaja iznosi i do 90 %, dok je iskoristivost dizelskog generatora do 93 %.

Troškovi održavanja osovinskog generatora penju se godišnje na 1,8 eura po kW, a dizelskih generatora do 13,5 eura po kW. Potrošnja ulja kod osovinskog generatora je neznatna, za razliku od potrošnje ulja dizelskog generatora, koja iznosi oko 1,63 g/kWh.



Slika 74. Područje rada osovinskog generatora

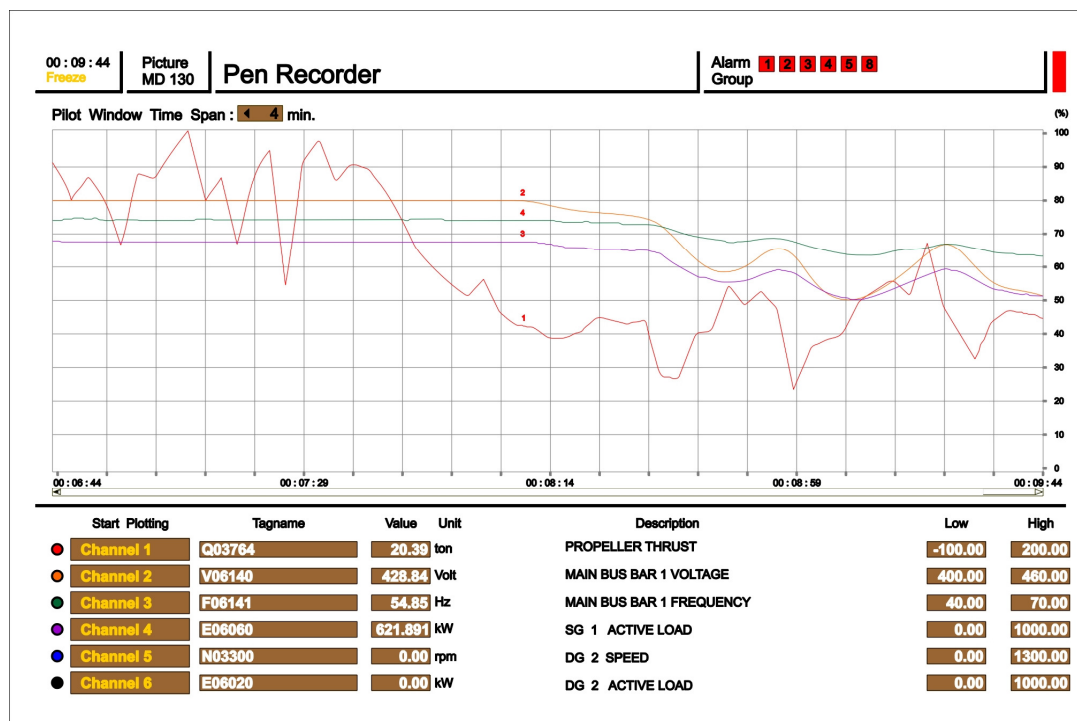
Navedenom analizom dolazi se na brodu “Zoranić”, koji u ovom istraživanju služi kao referentni brod (Poglavlje 7.5), s osovinskim generatorom od 1040 kW, do uštede od cca. 30 000 eura godišnje. Sustav je u potpunosti prilagođen strojarnici koja radi 24 h bez posade (Aut 1) i omogućuje brodovlasniku ukrcaj jednog člana posade manje [82].

### 6.2.1. Utjecaj osovinskog generatora na sigurnost brodskog pogona

Radom osovinskog generatora "štede" se dizelski generatori i produljuje njihov vijek, ujedno se smanjuje potrošnja goriva i održavanje. Najčešće pogreške u sustavu osovinskog generatora pojavljuju se na sklopki električne energije, a uzrok ispada generatora većinom leži u nagloj promjeni brzine vrtnje porivnog stroja. U kritičnim situacijama (Slow Down ili Shut Down), doći će do ispadanja osovinskog generatora i ukoliko je samostalan na mreži, dolazi do potpunog ispada mreže.

Za pogon dizelskog generatora potrebno je određeno vrijeme, kao i za ukopčavanje vitalnih potrošača. Ukoliko dizelski generator nije pripremljen za automatski start, a brod je ostao bez poriva, dolazi do nekontroliranog kretanja broda s mogućim tragičnim posljedicama.

Na strojarskom simulatoru, simuliran je scenarij plovidbe u lošim vremenskim uvjetima, definiranim morem 10 po Beaufort-ovoj ljestvici (Slika 75.). Zbog vrlo loših vremenskih uvjeta, dolazi do alarma visoke i niske razine ulja u karteru dizelskog generatora i slivnom tanku porivnog motora. Zbog velikih valova motor je preopterećen pa je potrebno smanjiti opterećenje.



Slika 75. Simulacija rada osovinskog generatora u nepovoljnim vremenskim uvjetima plovidbe

Tijekom izranjavanja brodskog vijka, dolazi do naglog povećanja brzine vrtnje i vibracija, što izaziva odstupanja frekvencije, koje uzrokuje ispad osovinskog generatora. Na rezultatu simulacije moguće je utvrditi vremenske promjene potisne sile, frekvencije, napona i opterećenja osovinskog generatora, te brzine vrtnje i opterećenja dizelskog generatora.

### 6.3. Turbogenerator

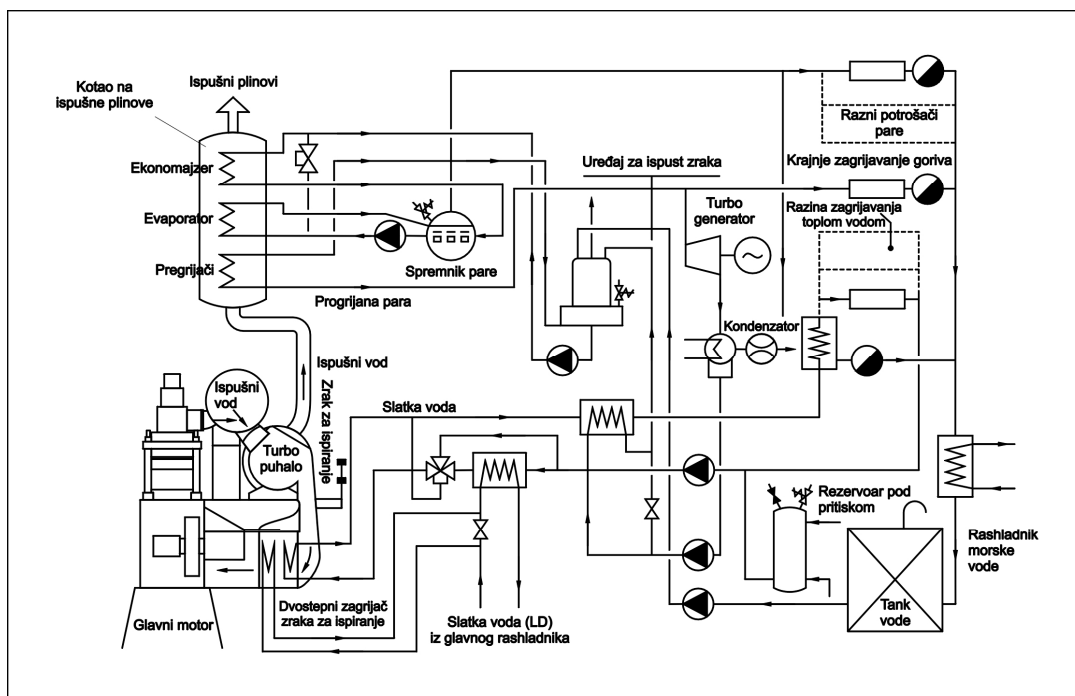
Zahtjev za što ekonomičnijom proizvodnjom električne energije na brodu, doveo je do uporabe parnih turbina kao pogonskog uređaja za generatore, tzv. turbogeneratore, te kombiniranog rada dizelskog generatora i turbogeneratore. Kombinirani rad zasniva se na principu da u plovidbi potrebnu električnu energiju proizvodi utilizacijski turbogenerator, korištenjem otpadne topline ispušnih plinova porivnog motora, a dopunjava ga ili ukoliko porivni motor ne radi, tu funkciju preuzima dizelski generator. Rekuperacija energije ispušnih plinova ovisi o nizu tehnoloških i ekonomskih čimbenika, određenih uvjetima plovidbe broda i stanjem i izvedbom porivnog postrojenja. Analiza ekonomičnosti utilizacijskih postrojenja ukazuje da se početna investicija, koja je oko 40 posto viša od investicije za dizelski generator, uštedom na pogonskim troškovima turbogeneratore isplati za tri do četiri godine, a pritom više od dvije trećine uštede otpada na troškove goriva.

Mogućnost pretvorbe energije ispušnih plinova porivnog motora u električnu energiju pomoću kotla utilizatora i turbogeneratore, kreće se u odnosu na maksimalno instaliranu snagu porivnog motora u granicama od 8 do 13 % za četverotaktne dizelske motore i 5 do 9 % za dvotaktne dizelske motore (Slika 76.).

Spomenuta je mogućnost u raskoraku s potrebama za električnom energijom na različitim tipovima broda, te se prije donošenja odluke o instalaciji sustava treba vrlo pažljivo utvrditi bilanca potrebne električne energije i raspoložive pare. Zbog velikih napora za poboljšanjem toplinske efikasnosti suvremenih dizelskih motora, smanjuje se temperatura (toplinska energija) ispušnih plinova, zbog povećanja temperature rashladne vode na izlazu iz motora, a time se naravno umanjuje i učin utilizacijskog kotla, što utječe na količinu proizvedene pare.

Najekonomičnije se na brodu može proizvoditi električna energija kombinacijom turbogeneratore i osovinskog generatora, pri čemu u plovidbi primarnu električnu energiju proizvodi utilizacijski turbogenerator, a dodatnu energiju daje osovinski generator pokretan porivnim motorom koji troši jeftino teško gorivo.





Slika 76. Iskorištavanje otpadne topline ispušnih plinova GM za proizvodnju el. energije

Naravno da je takav pogon moguć samo kod vrlo sofisticiranog i automatiziranog brodskog strojnog kompleksa koji treba ispuniti dvije osnovne zadaće, a to je međusobno usklađivanje pogona raznovrsnih agregata brodske mreže i osiguravanje osnovnog opterećenja mreže energijom iz turbogeneratorsa, te ekonomično i pogonski sigurno koordiniranje pogona brodske elektrane i porivnog motora pri radnim brzinama vrtnje osovine brodskog vijka.

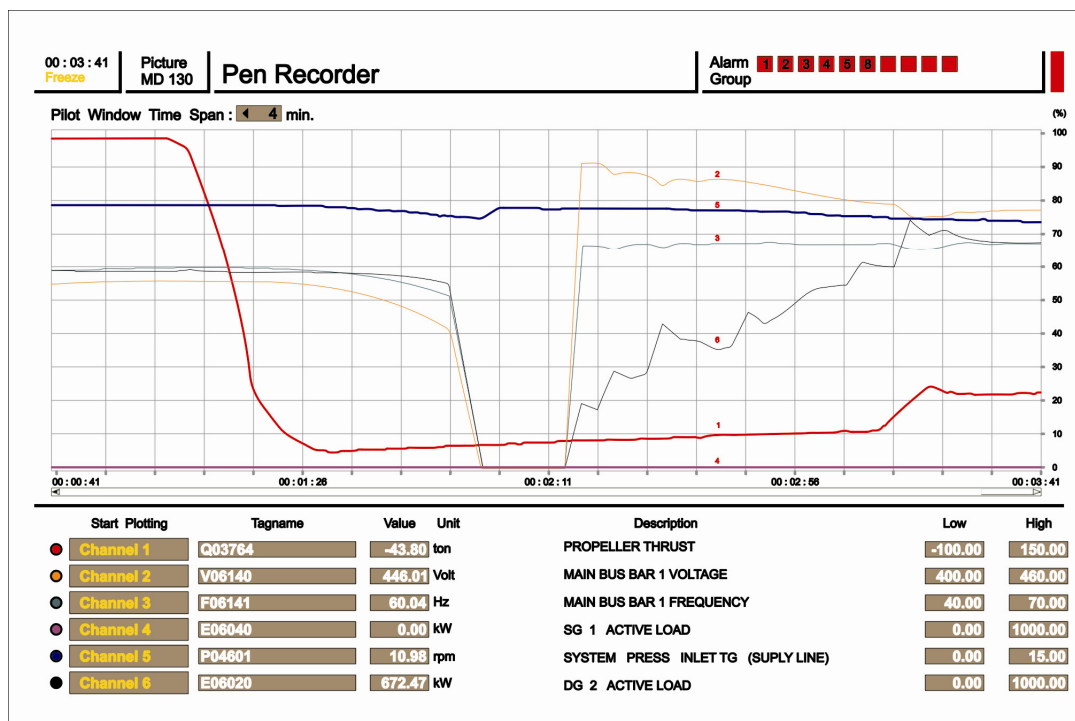
Ukoliko turbogenerator pomaže osovinski generator, mora imati samo dio snage koja prelazi mogućnosti utilizacijskog postrojenja. Isto se zahtijeva i u slučaju da turbogenerator pomaže dizelski generator.

Iz navedenog slijedi da je osnovna zadaća automatizacije omogućiti proizvodnju primarne električne energije onom agregatu, koji u paralelnom radu s drugim agregatom, troši jeftiniju primarnu energiju te pokriva osnovno opterećenje brodske mreže. Međutim, to ne znači da se ovakav način proizvodnje električne energije može uspješno primijeniti za sve tipove brodova, te da samo prikazani sustav sam određuje ekonomičnost cijelog brodskog pogona. Proizvodnju električne energije treba promatrati kao dio visokointegriranog sustava porivnog postrojenja s pomoćnim pogonima, pa se mora prilagoditi karakteristikama porivnog stanja i zahtjevima ekonomičnosti cijelog brodskog sustava, a ne obratno.

### 6.3.1. Utjecaj turbogeneratorsa na sigurnost brodskog pogona

U proteklom je razdoblju, parna turbina u brodskom strojnom kompleksu bila u širokoj uporabi, kako za proizvodnju električne energije, pogon pumpi tereta, pogon ventilatora, kompresora, tako i kao porivni stroj. Stoga, postoji dovoljno informacija o sigurnosti i pouzdanosti brodskih parnih turbina, te utjecaju visokih tlakova, temperatura, centrifugalnih sila, promjenjivih opterećenja, vibracija, korozije, erozije te drugih čimbenika, koji utječu na turbinu. Kako je parna turbina sastavljena od obnovljivih elemenata, time je njena pouzdanost razmjerno velika. Sam turbogenerator, kao samostalna jedinica, ima pojedine osjetljive elemente, kao što su lopatice turbine, ležajevi, osovina i sustav hlađenja. Na normalan pogon utječe vremensko razdoblje opskrbe parom, bilo iz kotla loženog naftom ili utilizacijskog kotla, pri čemu je kotao ložen naftom kompleksniji, budući u kotlu imamo postupno izgaranje koje zahtijeva pripremu goriva, zraka, vode, pare itd. Analizirajući navedene činbenike može se zaključiti da je ugradnja brodskog turbogeneratorsa opravdana, međutim, pogon je vrlo osjetljiv na mnoge parametre koji utječu na kontinuiran rad, a nedostatak je i dug period pripreme i upućivanja.

Na strojarskom simulatoru je priređen scenarij kvara turbogeneratorsa (Slika 77.), koji u određenom trenutku, zbog nepredviđenih razloga, izaziva pad snage porivnog motora sa 100% na 50 % snage, u pogonu u kojem turbogenerator proizvodi struju za brodske potrebe, a dizelski generator je u pričuvi.



Slika 77. Simulacija kvara sustava turbogeneratorsa

Padom snage porivnog stroja dolazi do smanjenja količine i parametara ispušnih plinova. Ukoliko se u pogonu nalazi kotao ložen naftom, uputit će se u roku od 50 sekundi, budući da je naglo pao tlak u utilizacijskom kotlu. Za upućivanje kotla potrebno je omogućiti startanje ventilatora za propuhivanje kotla, a njegovo dostizanje punog učinka prouzročit će veliki startni tok, koji utječe na pad frekvencije, što će prouzročiti ispad turbogeneratorskog. Nakon tri sekunde upućuje se dizelski generator koji je nakon pedeset sekundi spreman je za početak postupnog opterećenja vitalnih potrošača.

#### **6.4. Izvor električne energije u nuždi**

SOLAS konvencija propisuje, da svi putnički i teretni brodovi moraju imati neovisni izvor električne energije za rad u nuždi. Većinom je taj zahtjev ispunjen dizelskim generatorom u nuždi. Veličina agregata određuje se na osnovi potrebe električne energije za šestosatno opskrbljivanje svih brodskih službi, koje su u nuždi potrebne za sigurnost ljudi na brodu.

Pogon u nuždi sa svim pripadajućim sustavima mora se nalaziti izvan strojarne broda. Motor za pogon generatora mora imati neovisnu opskrbu gorivom s plamnikom od najmanje 43 °C. Sustav se mora upućivati automatski u slučaju prestanka napajanja iz glavnog izvora električne energije, a samo upućivanje mora biti izvedeno tako da generator može postići svoje puno radno opterećenje u što kraćem vremenu, ali ne duljem od 45 sekundi i to pod bilo kakvim uvjetima plovidbe broda. Svaki generator u nuždi, predviđen za automatsko upućivanje, mora biti opremljen uređajem za upućivanje odobrenim od nadležnog registra, koji može akumulirati energiju za tri uzastopna upućivanja. Drugi izvor energije mora se predvidjeti za dodatna tri upućivanja u vremenu od 30 sekundi, osim ako se dokaže da je ručno upućivanje uspješno i moguće.

## **7. MODEL BRODSKOG POMOĆNOG SUSTAVA ZA SIGURAN PORIV BRODA**

Mogući kvar, odnosno otkazivanje pomoćnih motora dovodi do ugrožavanja sigurnosti broda. Posljedica takvog stanja je zaustavljanje poriva broda, generator za nuždu je u radu, a brod pluta prepušten vanjskim uvjetima na koje posada ne može utjecati. Čekanje za osposobljavanje pomoćnih motora može potrajati nepredvidivo dugo. Često se brod mora tegliti do prve luke, što brodaru nanosi velike gubitke u novcu i vremenu. Umjesto ovoga gubitka, kojeg prouzrokuje otkazivanje rada pomoćnih motora, potrebno je pronaći sustav koji će pokrenuti porivni motor u slučaju kvara dizelskih generatora. Ugradnja takvog sustava predstavljala bi povećanje sigurnosti brodskog strojnog kompleksa broda, posade i tereta, a smanjila gubitak koji proizlazi od čekanja i tegljenja broda.

U prethodnim poglavljima analiziran je pojedinačni utjecaj različitih vrsta generatora na poriv broda iz čega se može ustanoviti, da su svi sustavi za dobivanje električne energije na brodu, osjetljivi na moguća ekstremna pogonska stanja koja pri tome ugrožavaju brod kao cjelinu. Da bi se postavio model veće pouzdanosti, potrebno je definirati sva stanja u kojima se mogu nalaziti brodski sustavi.

### **7.1. Stanja brodskog sustava**

- **Plovidba broda**

Plovidba podrazumijeva porivni sustav, u kome porivni stroj s pomoćnim sustavima i uređajima koji ga opslužuju, ima dominantnu ulogu. Za poriv broda (plovidbu), u ovom istraživanju, služi dvotaktni sporookretni dizelski motor koji mora ispunjavati određene uvjete, kako bi se osigurala sigurna i ekonomična plovidba broda. Tijekom plovidbe, porivni stroj mora imati u pogonu svoje neophodne sustave, gorivo, ulje za podmazivanje, vodu za hlađenje, zrak za upućivanje i ventilaciju strojarnice. Za pokretanje navedenih sustava potrebna je električna energija koja se dobiva pomoću dizelskih generatora, turbogeneratora i osovinskog generatora, a tijekom plovidbe opskrbljuje još potrošače kao što su kormilarski uređaji, rasvjeta, separatori goriva i maziva, provijant broda, klimatizacija, evaporator pitke vode, protupožarni sustav, balastni i kaljužni sustav i druge potrošače. Da bi se zadovoljilo sve potrošače električne energije tijekom plovidbe broda, definira se bilanca električne energije, koja služi za određivanje agregata dizelskih generatora i drugih proizvođača električne energije.

- **Manevar broda**

Pod manevrom se podrazumijeva premoštenje unaprijed zadanog programa brzine vrtnje glavnoga motora s reduciranom brzinom (ili zakreta krila brodskog vijka). Kod fiksnih brodskih vijaka motor se obično zaustavlja i ponovo upućuje u ovisnosti o smjeru vožnje naprijed ili nazad. Turbogenerator i osovinski generator su van pogona, zbog poremećaja brzine vrtnje motora, pa su zbog sigurnosti u pogonu dva dizelska generatora. Tijekom manevra, u radu su svi neophodni sustavi, upravlja se s komandnog mosta, a sa strojem se može upravljati iz kontrolne kabine stroja (control room), kao i lokalno.

- **Lučka služba**

Kada je brod vezan u luci, stavljaju se u pogon sustavi lučke službe, a rade samo neophodni sustavi za život i rad na brodu. Za ukrcaj i iskrcaj tereta mogu raditi dizelski generatori, ali se struja može priključiti i s kopna. U radu je klimatizacija i rashladni sustav provijanta. U luci se može brzo osigurati upućivanje porivnog motora i svih neophodnih sustava. Novi motori imaju mogućnost upućivanja s teškim gorivom, pa u luci mora raditi kotao ložen naftom za zagrijavanje teškog goriva i slatke vode za zagrijavanje motora, što zahtijeva konstantnu cirkulaciju teškog goriva od tanka mješača, preko zagrijača i napojne pumpe do rasprskavača i nazad u tank.

- **Sidrenje**

Kada je brod na sidrištu, stanje broda je gotovo isto kao u manevriranju, a porivni motor je u stanju pripravnosti i većinom radi samo jedan dizelski generator. Tijekom dizanja sidra, većinom zbog sigurnosti, rade dva dizelska generatora.

- **Brod u doku**

Tijekom dokovanja broda, energetska sustav je isključen. Električna energija se dovodi iz brodogradilišta, a na brodu postoji određeni broj potrošača, koji permanentno rade, kao što je ventilacija strojarnice i skladišta, klimatizacija nadgrađa, rashladni sustav provijanta i protok vode.

## 7.2. Automatizirana proizvodnja električne energije

Proizvodnja električne energije na brodu, nužno uključuje i njenu razdiobu i potrošnju, budući da se električna energija proizvodi samo onda i samo toliko, kada i koliko električne energije zahtijevaju električna trošila. Zadatak automatiziranih postrojenja za proizvodnju i raspodjelu električne energije, je da u promjenjivim brodskim režimima, trošilima permanentno osiguravaju potrebnu električnu energiju. Ugrađena automatika i informatika pri smetnjama i nepravilnostima u bilo kojem dijelu brodskog električnog postrojenja, poduzima sve potrebne mjere da se barem važna trošila kontinuirano napajaju električnom energijom i istovremeno sprječava proširenje smetnje. Osim sigurnosti, automatizacija djeluje na ekonomičnost pogona uštedom goriva i uključivanjem samo onoliko agregata koliko je potrebno da se optimalnim pogonom generatora pokrije opterećenje brodske mreže.

Podsustav automatike generatora i automatizacija opskrbe trofazne brodske mreže električnom energijom obuhvaća:

- automatsko reguliranje napona i frekvencije generatora,
- automatsku sinkronizaciju i paralelni rad generatora,
- automatsku raspodjelu opterećenja između generatora,
- automatsko uključenje i isključenje generatora ovisno o opterećenju brodske mreže,
- programirano priključivanje trošila velikih snaga (npr. kaveznih motora), čime se sprječava preopterećenje,
- automatsko pretpodmazivanje dizelskih motora,
- automatizaciju uređaja za signalizaciju i zaštitu generatora,
- automatsko ponovno uključivanje mreže kod njenog ispadanja iz pogona ("black out" funkcija).

Ukoliko se električna mreža u plovidbi napaja samo iz jednog agregata, u slučaju njegovog preopterećenja ili kvara i ispada iz pogona, automatski se mora pokrenuti agregat u pričuvi i priključiti na mrežu u vremenu do 45 sekundi. Važna trošila, kao npr. pomoćni strojevi, kormilarski uređaj i drugi sustavi koji uvjetuju sigurnost broda, a koji su prethodno bili u radu, trebaju se automatski postupno uključivati na mrežu. Kada agregat ispadne iz pogona zbog kratkog spoja na sabirnicama glavne sklopne ploče, tada mora biti blokirano ponovno uključivanje sklopke generatora i istovremeno pokretanje pričuvnog agregata, dok se kvar ne otkloni, a slučaj se signalizira posebnim alarmom.

Kada do preopterećenja brodske mreže dolazi zbog uključivanja prevelikih snaga trošila, ili zbog ispada generatora iz pogona radi njegovog preopterećenja

ili kvara, automatski se pokreću (start program) jedan ili više agregata, koji se selektivno i postupno uključuju na sabirnice glavne sklopne ploče, uz prethodnu automatsku regulaciju napona, frekvencije i sinkronizaciju. Za sve agregate obično je predviđeno jedno računalo, u kojem je ugrađena automatika motora s različitim funkcijama, koje ovise o tipu motora i ugrađenoj regulaciji. Kod automatike dizelskih generatora vrlo su bitni parametri startanja i zaustavljanja motora, kao i pretpodmazivanje i zagrijavanje motora u pričuvi.

Automatika za ponovno uključivanje mreže, djeluje kada nestane napona na sabirnicama trošila ("black-out") i strojevi na mreži ostaju bez električne energije, pa barem jedan agregat mora brzo startat i priključiti generator na mrežu, što zahtijeva stalno održavanje električnih agregata u stanju pripravnosti.

Unatoč tome, moguće je da kod automatskog pokretanja prvi start ne uspije, pa je predviđeno automatsko ponavljanje pokretanja. Ako i tada start ne uspije, dojavljuje se da se agregat ne može pokrenuti. Automatika "black-out" djeluje na pokretanje svih postojećih agregata i pokrene one koji su sposobni za pogon. Pri istovremenom startanju više agregata, na mrežu se priključuje samo onaj generator koji je prvi sposoban za pogon i u stanju je zadovoljiti potrošnju, čime sabirnice dobiju napon. Preostali se generatori ne priključuju na mrežu, budući da se ne mogu automatski sinkronizirati.

Nakon otklanjanja potpunog prekida električnog napajanja i uspostavljanja napona na glavnoj sklopnoj ploči, automatsko uključivanje trošila potrebnih za poriv i upravljanje brodom, mora se izvesti postupno, da se ne preoptereti generator. Najprije se uključuju pumpe kormila i pumpe ulja za podmazivanje. Kod prebrzog ponovnog uključivanja trošila, može doći do prevelikog pada napona i ponovnog prekida napajanja.

Današnjim automatiziranim brodskim sustavima brod je dobio nove kvalitete s kojima pomorstvo u cjelini postaje svestranije i uspješnije uz postignut veći stupanj sigurnosti. Međutim, i kod automatiziranih brodova nastaju razlozi zbog kojih se mora uključiti posada u upravljanje bilo kojim dijelom automatiziranih uređaja. Zbog toga i najsuvremenija rješenja moraju imati mogućnost da svaki uređaj može raditi i u ručnom režimu rada. U slučaju "black-out" i u nemogućnosti pokretanja dizelskih generatora, automatski se ukopčava agregat u nuždi, koji može prihvatiti samo nužne potrošače, ali ne i potrošače za start porivnog motora pa tada brod pluta na moru ili se usidri. Ukoliko popravak dizelskih generatora nije moguć, brod se mora tegliti do prve luke.

### **7.3. Analiza ishodišta za postavljanje modela sigurnijeg brodskog pogona**

Da bi se mogla analizirati sigurnost modela brodskog pogona, potrebno je definirati blok dijagram dizelskih generatora modernog brodskog strojnog kompleksa. Model treba sadržavati stanja rada generatora u seriji, paraleli i rada u seriji i paraleli. Pojedini sustavi imaju veći ili manji vremenski kvar, a neki i vrlo mali, gotovo trenutačni, što utječe na cjelokupnu sigurnost pogona, kao što postoje elementi, koji pri ispadu ne izazivaju kvar sustava, već degradaciju. Kompliciranost modela dodatno povećavaju različiti režimi rada pogona i određena stanja, u kojima se odvija poriv broda. Na osnovi opisa pojedinih sustava i njihovog utjecaja na djelovanje porivnog motora, te utjecaja na pojedinačno ispadanje generatora, moguće je napraviti model cijelog sustava pogona. Analizirajući ugrađene generatore na brodovima s porivnim sporookretnim dizelskim motorom, može se utvrditi da postoje tri različite izvedbe sustava proizvodnje električne energije:

- sustav generiranja električne energije, s ugradnjom dva ili tri dizelska generatora,
- sustav generiranja električne energije s dva dizelska generatora i s osovinskim generatorom,
- sustav generiranja električne energije s dva dizelska generatora i s tubogeneratorom.

#### **7.3.1. Model pogona s tri dizelska generatora**

Po propisima registra kao i bilancama električne energije, u navigaciji treba zadovoljavati jedan dizelski generator, drugi je u stanju pripravnosti, dok je treći pričuva. U stanju pripravnosti je i generator u nuždi, koji pri radu opskrbljuje potrošače kormilarskog sustava u nuždi, nužnu rasvjetu i sustav upravljanja, a na zahtjev brodovlasnika može se predvidjeti još poneki potrošač.

Ulaz u sustav električnog toka kreće iz smjera generatora koji ima podsustav nadzora, alarma i kontrolne funkcije. Generatorske upravljačke jedinice mogu međusobno komunicirati zbog ostvarenja potpunog automatskog sustava upravljanja energijom generatorskih postrojenja (Slika 78.).

Kada dođe do preopterećenja brodske mreže kod uključivanja prevelikih snaga trošila, ili zbog ispada generatora iz pogona radi njegovog preopterećenja ili kvara, automatski se pokreće agregat u pričuvi koji se selektivno i postupno uključuje na sabirnice glavne sklopne ploče uz prethodnu automatsku regulaciju



napona, frekvencije i sinkronizaciju. Automatsko sinkroniziranje generatora koji je startao je neophodno, a ukoliko nema dovoljno raspoložive pričuvne snage za priključak na mrežu trošila velikih snaga (npr. motor sidrenog vitla), prije uključivanja automatski se prikuplja podatak o još raspoloživoj snazi. Ukoliko ona nije dovoljna, automatski se starta treći agregat, generator se sinkronizira na mreži i tek tada uključe potrošači. Kada iz pogona, u kojem su u paralelnom radu uključena dva generatora, ispadne jedan od njih, mora se onemogućiti preopterećenje preostalog generatora. To se izvodi automatskim isključivanjem manje važnih trošila, kako bi se omogućilo sigurno napajanje porivnih, kormilarskih i drugih sustava važnih za sigurnost broda.

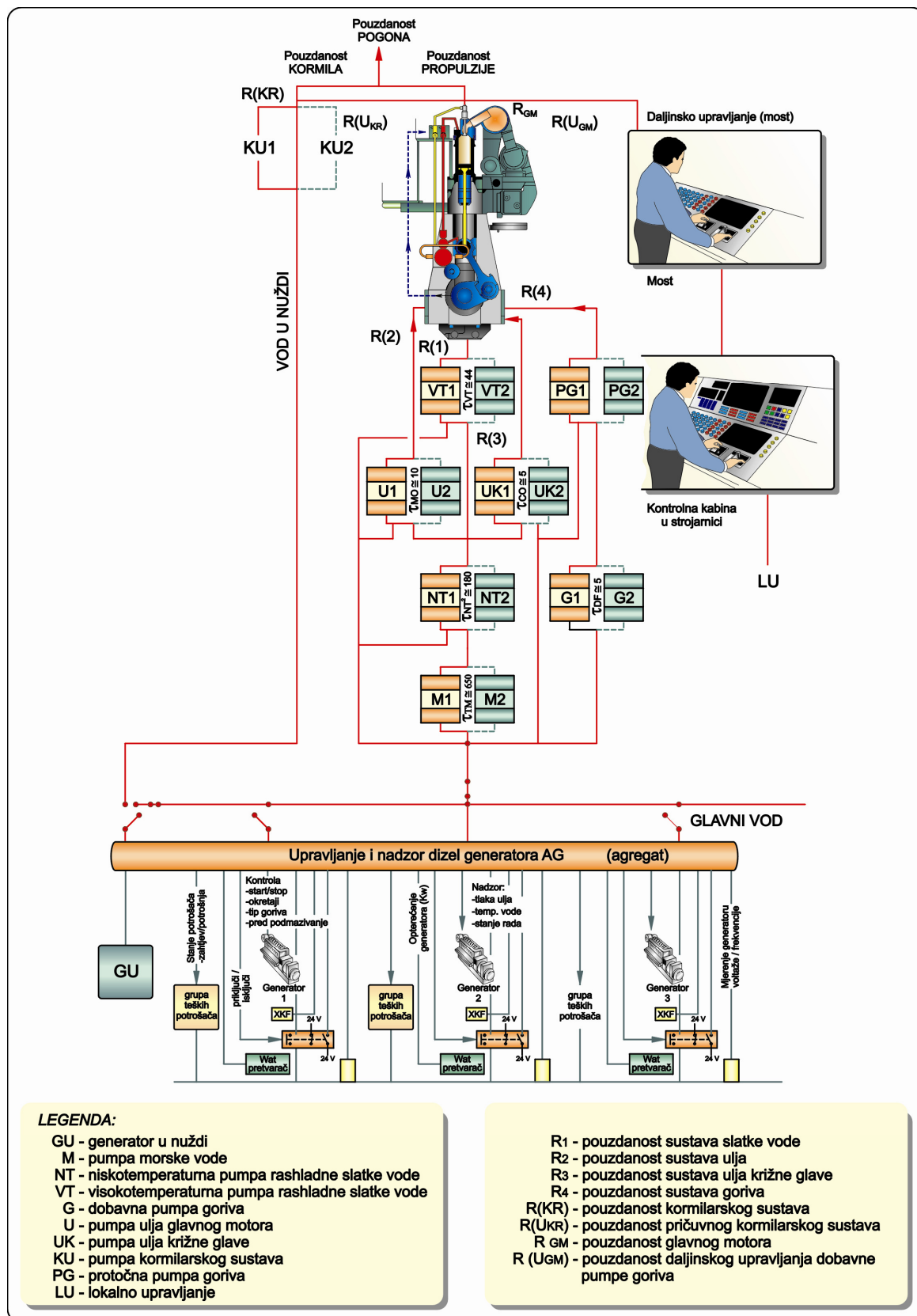
Kod smanjenja opterećenja brodske mreže, pri čemu bi se raspoloživa pričuvna snaga nepotrebno povećala, jedan agregat se automatski stavlja izvan pogona i zaustavlja. Na taj se način izbjegava da dizelski agregat radi s malim opterećenjem pod nepovoljnim pogonskim uvjetima i s malim stupnjem iskoristivosti.

Osim automatike samog generatora, automatika dizelskog motora ima još funkcije

- nalog za pokretanje,
- nadzor tlaka ulja za podmazivanje,
- nadzor tlaka i temperature vode za hlađenje motora,
- nadzor temperature i tlaka goriva,
- nalog za isključivanje generatora i zaustavljanje motora i sl.

Trošila električne energije na brodu uglavnom se klasificiraju u grupe posebnih trošila, važnih i manje važnih trošila. U prvu grupu spadaju uređaji čiji je kontinuitet napajanja od presudnog značaja za sigurnost broda i plovidbe, kao što su navigacijski sustavi, kormilarski sustav, dojavni i alarmni sustav, protupožarni i drenažni sustav, te neophodni sustavi za kontinuirani rad porivnog stroja. U drugu grupu spadaju trošila koja nisu neprekidno u pogonu, a njihovom uključivanju uvijek prethodi najava, nakon čega slijedi provjera trenutno raspoloživih energetske resursa i po potrebi aktiviranje pričuvnog agregata. Manje važna trošila uključuju se i isključuju automatski, a njihov rad ne smije utjecati na sigurnost broda i plovidbe.

Na prikazanom modelu (Slika 78.) su dva dizelska generatora u pripravnosti i u slučaju ispada iz mreže radnoga generatora, dolazi do automatskog startanja pričuvnog dizelskog generatora, koji u roku od deset do petnaest sekundi normalno radi i preuzima opterećenja potrošača. Da bi se osigurao rad porivnog motora, moraju se uputiti, ili održati u radu njegovi vitalni sustavi.



Slika 78. Model sustava s tri dizelska generatora

Osnovni sustav upućivanja je sustav rashlade morskom vodom, koji ima paralelno vezane dvije pumpe, za koje je simulacijom na strojarskom simulatoru (pogl. 4.2., Slika 37.) utvrđen veliki vremenski zastoje utjecaja na kvar pogona, odnosno do smanjenja opterećenja motora potrebno je približno deset minuta, a do prestanka rada porivnog motora petnaest minuta.

Morskom vodom izravno se hladi niskotemperaturni sustav (NT) slatke vode za brodski pogon, u kojem su paralelno spojene dvije pumpe morske vode ( $M_1$ ,  $M_2$ ) uz automatsko očitavanje količine protoka i temperature morske vode na ulazu i izlazu iz izmjenjivača topline. Niskotemperaturni sustav slatke vode pokreću dvije paralelno spojene pumpe ( $NT_1$ ,  $NT_2$ ). Niskotemperaturni sustav hladi visokotemperaturni sustav GM pomoću dvije paralelno spojene pumpe ( $VT_1$ ,  $VT_2$ ), a protok i temperatura visokotemperaturne vode na ulazu i izlazu iz motora permanentno se prikazuju i automatski su vezani na regulaciju opterećenja, odnosno prestanak rada motora. Niskotemperaturni sustav spojen je s rashladnicima ulja GM i križne glave i pomoću termoregulacijskih ventila regulira količinu protoka vode, kako bi temperatura ulja na ulazu u motor bila konstantna. Sustav ulja za podmazivanje GM spojen je s dvije paralelno vezane pumpe ( $U_1$ ,  $U_2$ ), kao i pumpe križnih glava ( $UK_1$ ,  $UK_2$ ). Tlak i temperatura vezani su s automatskom regulacijom GM, a pad tlaka ulja u oba sustava reagira na prisilno zaustavljanje porivnog motora uz pripadni alarm. Na promjenu temperature, sustav reagira smanjenjem brzine vrtnje do zaustavljanja motora. Vremenski utjecaj na oba sustava je vrlo mali, pa u slučaju kvara jedne pumpe, druga mora startati u roku od 5 do 10 sekundi.

Sustav goriva spojen je u seriju dobavnim pumpama goriva ( $G_1$ ,  $G_2$ ) i protočnim pumpama goriva ( $PG_1$ ,  $PG_2$ ), koje su međusobno paralelno spojene. Motor je povezan s signalizacijom protoka goriva u slučaju kvara dobavnih pumpi goriva, pa će porivni motor raditi do potrošnje goriva u odzračnom tanku (tank mješač), zagrijaču i cjevovodima. Kvarom protočnih pumpi goriva, porivni motor neće prestati raditi, ali će imati degradaciju protoka od približno 50%. Sve paralelno spojene pumpe imaju pričuvnu pumpu u pasivnom stanju pripravnosti i u slučaju kvara pumpe u pogonu, automatski se starta druga pumpa. Ukupna vjerojatnost pouzdanog djelovanja porivnog motora jednaka je pouzdanosti ukupnog sustava za opsluživanje motora  $R(1)$ ,  $R(2)$ ,  $R(3)$ ,  $R(4)$  i sustava daljinskog upravljanja glavnog motora. Vjerojatnost djelovanja cijelog pogona ovisna je o vjerojatnosti rada GM, propulzora i kormilarskog sustava.

Kormilarski sustav smatra se najvažnijim sustavom za sigurnost broda pa će u slučaju ispadanja dizelskog generatora, automatski startati generator u nuždi u roku od šest sekundi i kao prvi potrošač ukopčati kormilarski sustav. Ukoliko dođe do ispada električne energije u navigaciji, brod će zadržati relativno veliku brzinu, pa da bi zadržali nadzor kretanja broda, mora biti u kratkom vremenskom periodu pokrenut sustav kormilarenja i nužnog osvjetljenja broda pomoću generatora u nuždi. Ukoliko se u kratkom vremenskom periodu uspije osposobiti jedan od dizelskih generatora, automatika će u određenom intervalu startati sve

pumpe koje su bitne za rad porivnog stroja. Pokretanjem pumpi goriva, gorivo dolazi do visokotlačnih pumpi goriva na motoru što će, ako se brod i dalje kreće zbog inercijskih sila i time ujedno okreće i brodski vijak, pokrenuti porivni motor. Ukoliko su svi parametri ulja, vode i goriva u granicama normale, motor može normalno raditi. Kada se pri manjoj brzini broda ponovi ispad električnog protoka, prestaje rad neophodnih pumpi i motor se zaustavlja. Za ponovno upućivanje motora mora se upotrijebiti uputni zrak, pa je proces upućivanja porivnog stroja nešto dulji od prethodnog.

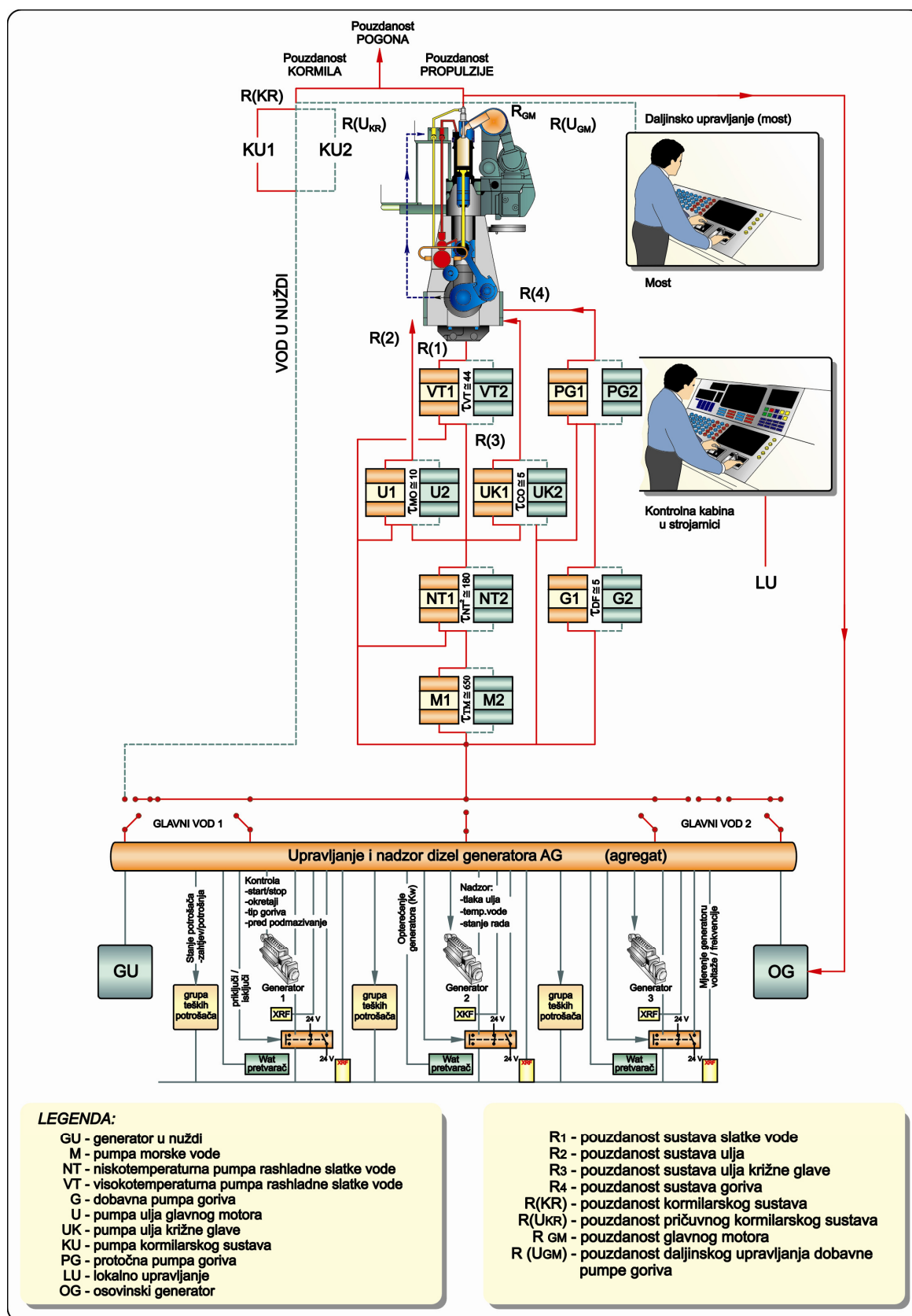
### **7.3.2. Model pogona s dizelskim generatorima i osovinskim generatorom**

Osovinski generator kao električni stroj pogonjen porivnim motorom, napaja električnu mrežu ili odvojena trošila proizvedenom električnom energijom. U tom se specifičnom obliku proizvodnje električne energije na brodovima koristi višak snage porivnog stroja za istodobni pogon osovinskog generatora. Osovinski generator mora brodskoj mreži davati, u području dopuštene brzine vrtnje, punu nazivnu snagu uz nazivni napon.

U slučaju plovidbe sa samostalnim osovinskim generatorom (Slika 79.), kružni tok ovisnosti u dijagramu zatvorenog sustava, prolazi kroz glavni motor i osovinski generator preko podsustava glavnog motora. U normalnim vremenskim uvjetima plovidbe ovakav model je siguran, čak se može konstatirati da je sigurniji od modela s dizelskim generatorima.

Kada brod ima brodski vijak sa fiksnim krilima i radi s promjenljivom brzinom vrtnje porivnog motora, dolazi do nestabilnog rada osovinskog generatora, pa se koriste samo kod vožnje naprijed i u određenom opsegu brzine vrtnje pogonske osovine (Slika 74.). Pri manevriranju i brzinama nepovoljnim za rad generatora, automatski se iskopčava osovinski generator, a starta dizelski generator.

Ukupna vjerojatnost pouzdanog djelovanja porivnog motora je ista kao u prethodnoj analizi i ovisna je o vrijednostima vezanima za opsluživanje pogona  $R(1)$ ,  $R(2)$ ,  $R(3)$ ,  $R(4)$  i daljinskog upravljanja glavnog motora. Vjerojatnost pouzdanog djelovanja cijelog pogona, ovisna je o vjerojatnosti pouzdanog rada osovinskog generatora, dizelskih generatora, porivnog motora i propulzora, te kormilarskog sustava. Za kormilarski uređaj i generator u nuždi, vrijedi isti princip kao i u prethodnom poglavlju.



*Slika 79. Model sigurnosti pogona s osovinskim generatorom na mreži*

### 7.3.3. Model pogona s turbogeneratorom

Na suvremenim brodovima određenih porivnih snaga može se vrlo ekonomično proizvoditi električna energija pomoću tzv. utilizacijskog turbogeneratorsa, koristeći ispušne plinove glavnog dizelskog motora za dobivanje pare u utilizacijskom kotlu. Kada je povrat otpadne topline nedovoljan, u slučaju smanjenja brzine vrtnje porivnog motora, automatski se starta dizelski generator i preuzima snagu električnih potrošača. Utilizacijski kotao može biti spojen s kotlom loženim naftom, a ekonomičnost postrojenja ostvaruje se korištenjem ispušnih plinova jeftinog goriva dizelskih motora. Ovakav se sustav većinom ugrađuje na brodove velikih porivnih snaga, koji plove na dugim linijama kao što su brodovi za prijevoz rasutog tereta i tankeri.

Pogon s turbogeneratorom može djelovati u svim pozicijama plovidbe broda, manevra i lučkog pogona. Tijekom plovidbe, dobivena električna energija pomoću utilizacijskog kotla i turbogeneratorsa je "besplatna", a prestankom rada porivnog stroja u pogon starta kotao ložen naftom. No, ovakav sustav ima i velike nedostatke:

- relativno dugo vrijeme potrebno za dobivanje adekvatne pare za pogon turbine,
- dugo vrijeme startanja turbine,
- zahtjevno održavanje pogona.

Promjenom opterećenja motora dolazi do nagle promjene proizvodnje pare u utilizacijskom kotlu te do promjene stanja turbine.

Kako suvremeni brodovi danas većinom plove bez stalnog nadzora posade u strojarnici, nedostaci sustava zahtijevaju veću angažiranost posade na brodu, a nje je sve manje, pa navedeni razlozi rezultiraju sve rjeđom ugradnjom ovakvih sustava na brodove, usprkos gotovo najekonomičnijem pogonu.

U slučaju plovidbe sa samostalnim turbogeneratorom (Slika 80.), kružni tok ovisnosti u dijagramu zatvorenog sustava prolazi kroz porivni motor i turbogenerator, preko utilizacijskog kotla i podsustava porivnog motora.

147

## 7.4. Pouzdanost pogona

Iz modela pouzdanosti pogona može se ustanoviti da, ukoliko se brod promatra kao jedan sustav, pouzdanost pojedinog broskog sustava ne može biti mjerilo raspoloživosti broda, iako se često raspoloživost porivnog sustava uzima kao mjera raspoloživosti broda, pa se raspoloživost broskog sustava u određenom vremenu definira vremenskim tijekom u kojem će sustav biti spreman za rad na zadovoljavajući način. Kako pouzdanost sustava predstavlja vjerojatnost da će sustav unutar nekog promatranog vremena raditi ispravno, odnosno raditi sa zadovoljavajućim performansama, slijedi da bi sustav radio ispravno moraju i sve njegove komponente funkcionirati ispravno.

Međutim, može se dogoditi da pojedina komponenta otkáže uslijed kvara, a sustav i dalje radi ispravno, što je uobičajeno kod sustava sa zalihom pojedinih komponenti. Također, postoje primjeri gdje sve komponente funkcioniraju u zadanim veličinama, ali neke od njih su na samim graničnim mogućnostima nefunkcionalnosti, pa takav učinak dovodi do kvara. Takvi su kvarovi najčešći kod električne opreme.

Ukoliko je pouzdanost mjerilo sposobnosti uređaja da radi zadovoljavajuće dok je u eksploataciji, tada je ovisni parametar pouzdanosti vrijeme. Ako uređaj radi povremeno, u pravilnim ili nepravilnim vremenskim intervalima, to može biti i broj operacija ili kombinacija broja operacija i vremena. Funkcioniranje sustava većinom ovisi o dvije komponente, od kojih jedna otkazuje zbog slučajnog kvara, a druga zbog vremenskog kvara. Obje komponente rade nezavisno jedna od druge, a do kvara na sustavu dolazi kada otkáže bar jedna od komponenata. Za istraživanje bitna je pouzdanost tijekom plovidbe broda.

Pouzdanost plovidbe ovisi o pouzdanosti glavnog porivnog stroja, koji je ovisan o pouzdanosti samog motora i sustava za opsluživanje motora u pogonu, odnosno o sustavima:

- morske vode  $M$ ,
- rashladnog sustava niske temperature  $NT$ ,
- rashladnog sustava visoke temperature  $VT$ ,
- podmazivanja glavnog motora  $U$ ,
- podmazivanja križne glave  $UK$ ,
- dobave goriva  $G$  i
- protočnog sustava goriva  $PG$ .



Sustav za upravljanje i nadzor porivnog motora  $U_{GM}$  ima tri podsustavna upravljanja:

- lokalno upravljanje porivnim motorom  $LU$ ,
- upravljanje iz kontrolne kabine  $KB$  i
- upravljanje iz komandnog mosta  $KM$ .

Pouzdanost pogona ovisi još o:

- pouzdanosti kormilarskog sustava  $KU$ ,
- pouzdanost sustava daljinskog upravljanja kormil. uređaja  $U_{KR}$ ,
- pouzdanosti propulzora  $P$ .

Svi navedeni sustavi ovisni su o pouzdanosti generatora  $GEN$ , odnosno agregata  $AG$ .

Slijedi da je pouzdanost pogona  $R_p$  s dizelskim generatorima funkcija ograničenih sustava, odnosno:

$$R_p = f(GEN; AG; M; NT; VT; U; UK; G; PG; U_{GM}; KU; U_{KR}; P), \quad (7.1)$$

gdje je:

$$R_{poriva} = R(GM) \cdot R(U_{GM}) \cdot R(P), \quad (7.2)$$

$$R_{kormilarenja} = R(U_{KR}) \cdot R(KU). \quad (7.3)$$

Pouzdanost djelovanja glavnog motora  $R(GM)$  jednaka je umnošku pojedinih sustava glavnog motora ( $R1 \dots R4$ ) i pouzdanosti rada konstruktivnih elemenata samog motora  $R(KE)$ ,

$$R(GM) = R_{(1)} \cdot R_{(2)} \cdot R_{(3)} \cdot R_{(4)} \cdot R(KE). \quad (7.4)$$

Kako je pouzdanost pogona jednaka pouzdanosti propulzije i kormilarenja,

$$R_p = R_{poriva} \cdot R_{kormilarenja}. \quad (7.5)$$

Iz prikazanog slijede tri mogućnosti za povećanje pouzdanosti pogona:

1. ***Pouzdanost pogona bit će veća s povećanjem broja paralelnih veza u sustavu pogona, što znači da dodatnom ugradnjom generatora povećavamo pouzdanost sustava, budući da dodatni uređaj povećava redundantnost sustava, gdje se nameće pitanje cijene i utjecaja dodatnog generatora na održavanje pogona.***
2. ***Pouzdanost pogona bit će veća s tehničkim poboljšanjem elemenata unutar sustava, čime se smanjuje učestalost kvara elemenata, a time povećava pouzdanost sustava, uz pitanje kako povećati pouzdanost rada generatora.***
3. ***Pouzdanost pogona bit će veća relacijskim isključivanjem pojedinih elemenata iz unutrašnjosti sustava pogona (jedm. 7.1), uz dilemu kako prestrukturirati sustav s namjenom isključivanja pojedinih elemenata.***

Analizirajući navedene tri mogućnosti dolazi se do zaključka da je najbolja prva, međutim, da bi se ugradio dodatni generator, mora se dokazati neophodnost i opravdanost investicije.

## 7.5. Procjena sadašnjeg stanja

U poglavlju 5. analizirane su baze podataka i stanje pouzdanosti sustava propulzije, gdje je definirano da od svih kvarova koji su utjecali na otkazivanje sustava propulzije broda, dominantnu ulogu imaju pomoćni brodski uređaji i pomoćni motori, koji sudjeluju s cca 54% kvarova. Također je ukazano da razvoj broskog strojnog kompleksa s gledišta sigurnosti poriva broda mora teći sustavno i da se osim povećanja zalihosti pojedinih podsustava, trebaju razvijati i alternativna rješenja koja će povećati sigurnost broda u cjelini. Neočekivani kvarovi u sustavu poriva izazivaju potpunu neupravljivost broda na neodređeno razdoblje. Tamo gdje se zbog velikih poslovnih gubitaka i ekoloških aspekata, gubitak poriva ne može tolerirati čak i na vrlo kratko vrijeme, brodovlasnici i brodograditelji, da bi smanjili rizik, prisiljeni su povećavati zalihost cijelog sustava.

Da bi se prikazao poslovni gubitak koji nastaje prekidom napajanja električnom energijom, analiziran je brod koji objedinjuje navedene zahtjeve vezane uz vrijednost tereta i ekološke aspekte. Takvim zahtjevima odgovara suvremeni tanker za prijevoz kemikalija *Zrinski* Tankerske plovidbe iz Zadra, čiji su podaci korišteni u analizi.

Svi podaci prikazani u tablicama i korišteni u analizi, vrijedili su krajem 2005. g. i predstavljaju službene podatke kompanije Lloyd's Register of Shipping (LR). Sadašnji troškovi i vrijednosti su promijenjene ovisno o stanju na tržištu, a u proteklom su se razdoblju jako mijenjali ovisno o konjunkturi ili krizi na tržištu, međutim, međusobni odnosi veličina su ostali isti pa su i rezultati analize relevantni.

Brod *Zrinski* prevozi naftne derivate, vrijednosti 255 do 300 \$ po toni. Specifična gustoća tereta kreće se od  $0.70 \div 0.90 \text{ t/m}^3$ . Ukupna vrijednost tereta za 98 % punog kapaciteta broda prikazana je u tabeli 9.

Tabela 7. Osnovni podaci referentnog broda

|                            |                   |                               |
|----------------------------|-------------------|-------------------------------|
| godina isporuke            |                   | 1993                          |
| ime broda                  |                   | ZRINSKI                       |
| brodogradilište            |                   | Split                         |
| tip broda                  |                   | tanker za prijevoz kemikalija |
| duljina                    | m                 | 236                           |
| širina                     | m                 | 39,44                         |
| visina                     | m                 | 21,30                         |
| gaz broda                  | m                 | 12,19                         |
| nosivost                   | t                 | 84000                         |
| volumen tereta             | m <sup>3</sup>    | 109 300                       |
| spec.gustoća tereta        | t/m <sup>3</sup>  | 0,75                          |
| pogonski tip               |                   | MAN B&W5L70MC                 |
| motor snaga                | kW                | 11 800                        |
| brzina vrtnje              | min <sup>-1</sup> | 100                           |
| brzina pri 85% max.snage   | čv                | 14,40                         |
| pomoćni snaga              | kW                | 3 x 1040                      |
| motori brzina vrtnje       | min <sup>-1</sup> | 720                           |
| el. snaga generatora       | kW                | 3 x 990                       |
| na gl. vodu osov. generat. | kW                | 1 x 1000                      |

Tabela 8. Prosječna vrijednost broda navedene klase

|                                           |                     |               |
|-------------------------------------------|---------------------|---------------|
| <i>nosivost</i>                           | <i>t</i>            | <i>84 000</i> |
| <i>vrijednost novog broda</i>             | $\$ \times 10^6$    | <i>37</i>     |
| <i>vrijednost olupine</i>                 | $\$ \times 10^6$    | <i>3</i>      |
| <i>razlika</i>                            | $\$ \times 10^6$    | <i>34</i>     |
| <i>eksploatacijski vijek</i>              | <i>g.</i>           | <i>25</i>     |
| <i>amortizacija</i>                       | $\$ \times 10^6/g.$ | <i>1,36</i>   |
| <i>prosječna starost</i>                  | <i>g.</i>           | <i>12</i>     |
| <i>ukupna amortizacija</i>                | $\$ \times 10^6$    | <i>16,3</i>   |
| <i>vrijednost broda</i> <i>rashodovan</i> | $\$ \times 10^6$    | <i>17,7</i>   |
| <i>prosje. starosti</i> <i>izgubljen</i>  | $\$ \times 10^6$    | <i>20,7</i>   |

Tabela 9. Prosječne vozarine referentnog broda

|                                                         |                                          |                                          |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| <i>vrijednost vozarine</i>                              | <i>najniža</i><br>$\$ \times 10^3 / dan$ | <i>najviša</i><br>$\$ \times 10^3 / dan$ |
| <i>slobodna plovidba</i>                                | <i>30,0</i>                              | <i>47,5</i>                              |
| <i>linijska plovidba</i>                                | <i>19,5</i>                              | <i>26,5</i>                              |
| <i>prosječni pretpostav.</i><br><i>gubitak vozarine</i> | <i>38,75 = 39</i>                        |                                          |

Tabela 10. Vrijednost tereta koji prevozi tanker Zrinski

| vrijednost tereta | specifična | 98% kapaciteta tankera |   | ukupna              |
|-------------------|------------|------------------------|---|---------------------|
|                   | \$ / t     | m <sup>3</sup>         | t | \$x 10 <sup>6</sup> |
| najviša procjena  | 300        | 109300      80000      |   | 24                  |
| najniža procj.    | 250        |                        |   | 20                  |
| srednja           | 275        |                        |   | 22                  |

Da bi analiza bila potpunija, odabrane su tri rute plovidbe broda *Zrinski*:

- Al Jubail u Saudijskoj Arabiji do Shellhavena u Engleskoj, udaljenost 6.365 nm, nakrcan teretom, povratak u balastu,
- Al Jubail do Singapura, 4.316 nm, nakrcan teretom, od Singapura do Mina Abdula u Saudijskoj Arabiji, 3.901 nm u balastu,
- Kuvajt do Sao Luisa u Brazilu, 9.149 nm, napunjen teretom, od Sao Luisa do Mina Abdula, 8.988 nm u balastu.

Prosječna udaljenost sve tri rute je oko 6.500 nm. Kako je vrijednost broda nakrcanog teretom mnogo veća nego u balastu, kod proračuna rizika treba uzeti u obzir i postotak vremena u nakrcanom stanju. Iz navedenih podataka slijede srednji stupnjevi iskoristivosti broda:

- ukrcan teretom      46 %,
- u balastu              26 %,
- u luci                  28 %.

Rizici tankera mogu se svrstati u tri kategorije i to rizik za sigurnost broda, rizik od onečišćenja okoliša i rizik od poslovnog gubitka. Rizik sigurnosti i onečišćenja okoliša vrlo je teško odrediti, pa ih je LR razvrstao na osnovu stupnja težine od 1 ÷ 4. Poslovni gubici se mogu kvantitativno relativno točno izračunati, a LR ih svrstava u četiri razine:

- A<sub>1</sub> - manje posljedice,
- A<sub>2</sub> - značajne posljedice,
- A<sub>3</sub> - teške posljedice,
- A<sub>4</sub> - katastrofalne posljedice i totalni gubitak broda.

Poslovni gubici zbog kvara brodskih sustava, uključujući i gubitke vozarine mogu se sistematizirati i prikazati tabelarno:

Tabela 11. Poslovni gubitci zbog kvara

| težina posljedice                            |                             | $A_1$   | $A_2$     | $A_3$     |
|----------------------------------------------|-----------------------------|---------|-----------|-----------|
| opseg troška popravka                        | $\$ \times 10^3$            | 1 – 100 | 100 – 500 | 500–1.500 |
| prosječan trošak popravka                    | $\$ \times 10^3$            | 50      | 300       | 1.000     |
| opseg trajanja popravka                      | dana                        | 0-5     | 5-15      | 15-45     |
| prosječan trajanje popravka                  | dana                        | 2,5     | 10        | 30        |
| specifični gubitak vozarine                  | $\$ \times 10^3/\text{dan}$ | 39      |           |           |
| gubitak vozarine zbog popravka               | $\$ \times 10^3$            | 97      | 390       | 1.170     |
| prosječan trošak popravka + gubitak vozarine | $\$ \times 10^3$            | 147     | 690       | 2.170     |

Ukoliko se simulira da brod u slučaju kvara s intenzitetom oštećenja  $A_2$  i  $A_3$  nema poriva i potrebna mu je pomoć tegljenja, nastupaju ozbiljni vremenski gubici (tab. 12.).

Tabela 12. Vremenski gubici zbog tegljenja tankera

| težina posljedice                     |      | $A_2$ $A_3$ |
|---------------------------------------|------|-------------|
| udaljenost od remont. brodogradilišta | nm   | 3.300       |
| udaljenost od tegljača                | nm   | 3.300       |
| srednja brzina neopterećenog tegljača | čv   | 12,0        |
| vrijeme čekanja tegljača              | dana | 11,5        |
| srednja brzina tegljenja              | čv   | 4,0         |
| trajanje tegljenja                    | dana | 34,4        |
| ukupno trajanje čekanja i tegljenja   | dana | 45,9        |

Podaci udaljenosti procijenjeni su na osnovi analize plovidbenih ruta tankera *Zrinski*, čija je prosječna udaljenost 6.500 nm. Ukoliko se kvar dogodi na polovici puta, udaljenost koju treba prijeći tegljač je cca. 3.300 nm. Uzevši u obzir brzinu tegljača u teglju dolazi se do ukupnog vremenskog gubitka od 45,9 dana, što će rezultirati značajnim poslovnim gubicima (tab. 13.). U analizi rizika, pretpostavke imaju nažalost ključnu ulogu, a točnost rezultata ovisi o točnosti ulaznih podataka i točnosti pretpostavljenih veličina. Kod proračuna rizika kvara nemoguće je predvidjeti kada i gdje će se ona dogoditi i da li će do kvara doći prvih ili posljednjih dana plovidbe broda, pa se prema tome ne može točno utvrditi ni udaljenost tegljenja broda do remontnog brodogradilišta. Usprkos tome, uzevši u obzir prosječne statističke vrijednosti broda, analizirani podaci su realni i vjerodostojni za tip broda i razdoblje istraživanja. Iz analize je vidljivo, da je vrijeme utjecajan čimbenik na poriv broda, a budući da su u brod uložena vrlo velika financijska sredstva, opisani gubitak zarade predstavlja značajan poslovni gubitak za brodara.

Tabela 13. Poslovni gubitak zbog tegljenja tankera

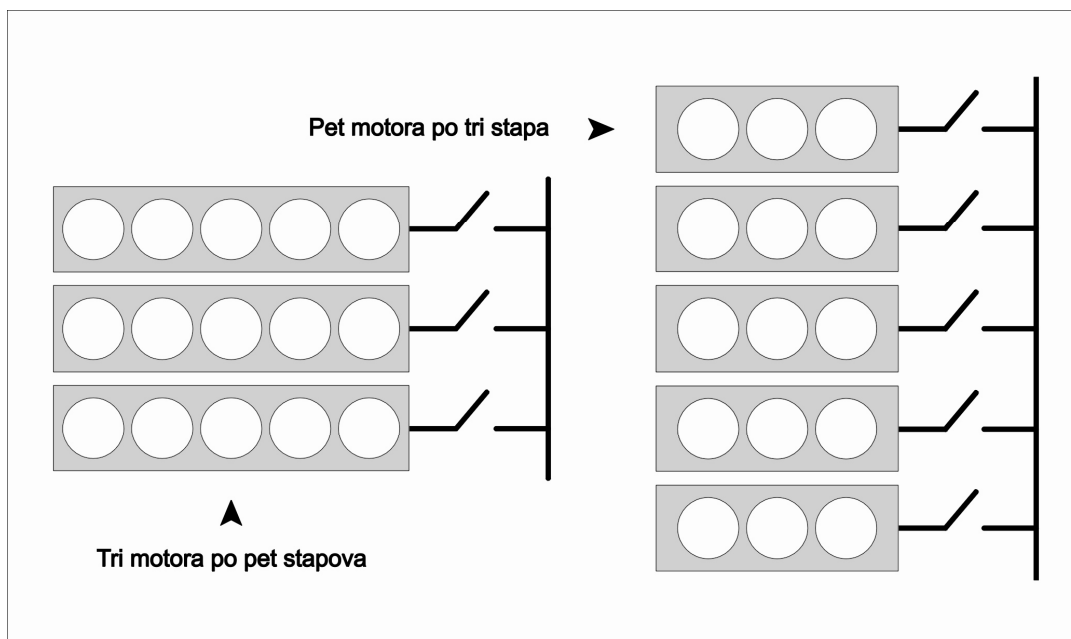
|                                         |                               |            |
|-----------------------------------------|-------------------------------|------------|
| <i>težina posljedice</i>                |                               | $A_2, A_3$ |
| <i>cijena tegljača</i>                  | $\$ \times 10^3 / \text{dan}$ | 8,0        |
| <i>troškovi goriva tegljača</i>         | $\$ \times 10^3 / \text{dan}$ | 5,0        |
| <i>dnevni trošak tegljača</i>           | $\$ \times 10^3 / \text{dan}$ | 13,0       |
| <i>ukupni trošak tegljenja</i>          | $\$ \times 10^3$              | 44,7       |
| <i>ukupno trajanje čekanja i teglj.</i> | <i>dana</i>                   | 45,9       |
| <i>spec. gubitak vozarine</i>           | $\$ \times 10^3 / \text{dan}$ | 39,0       |
| <i>gubitak vozarine</i>                 | $\$ \times 10^3$              | 1.790      |
| <i>tegljenje + gubitak vozarine</i>     | $\$ \times 10^3$              | 2.237      |

Kako će, zbog kvara dizelskog generatora i glavnog razvodnog napajanja električnom energijom, doći do zaustavljanja porivnog sporookretnog dizelskog motora, a ukoliko kvar nije moguće sanirati i do tegljenja broda, potrebno je odrediti bilancu električne energije potrebne za pokretanje neophodnih sustava za upućivanje i opsluživanje glavnog motora. Na temelju bilance električne energije definirat će se model sustava za pokretanje porivnog stroja u cilju povećanja sigurnosti broda, posade i tereta, te smanjenja poslovnih gubitaka tijekom eksploatacije broda.



## 7.6. Model povećanja pouzdanosti s povećanjem broja generatora

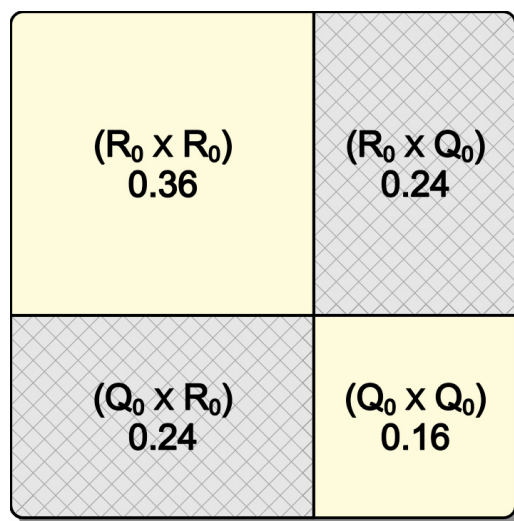
Ukoliko se u brodski strojni sustav na osnovi bilance energije, ugrade tri dizelska generatora s po pet cilindara što ukupno iznosi 15 cilindara, dobit će se ista energija koja bi se proizvela s pet generatora od po tri cilindra (Slika 81.). Obje kombinacije imaju istu izlaznu snagu, međutim, druga kombinacija ima veći stupanj sigurnosti.



Slika 81. Kombinacija ugradnji više generatora iste snage

Kada se kod paralelnog sustava povećane sigurnosti i pouzdanosti s dva stupnja zalihosti ( $n = 2$ ), u kojem se razlikuju tri opcije u zonama (Slika 82.), s  $R$  označi pouzdanost, a s  $Q$  nepouzdanost sustava, sustav može zauzeti jedno od tri moguća stanja:

- *stanje složene pouzdanosti* → bijelo područje ( $R_o \times R_o$ )  
→ pouzdanost x pouzdanost,
- *stanje relativne pouzdanosti* → dva šraf. područja ( $R_o \times Q_o$  ili  $Q_o \times R_o$ )  
→ pouzdanost x nepouzdanost, te
- *stanje složene nepouzdanosti* → potamnjeno područje ( $Q_o \times Q_o$ )  
→ nepouzdanost x nepouzdanost .



Slika 82. Kombinacijski dijagram paralelnog sustava drugog reda

S gledišta povećanja pouzdanosti, vrlo su važna dvostruko šrafirana područja. Ukoliko se za osnovnu pouzdanost uređaja, koji čini paralelni redundantni sustav, odabere  $R_0 = 0,6$ , odnosno nepouzdanost  $Q_0 = 0,4$ , sustavom dvostupanjske zalihosti povećava se pouzdanosti na  $R_2 = 0,84$ , (suma stanja složene pouzdanosti i stanja relativnih pouzdanosti iz kombinacijskog dijagrama), čime se smanjuje nepouzdanost a  $Q_0 = 0,4$  na  $Q_2 = 0,16$ .

Ukoliko se promatra  $n$  – složeni model, s pouzdanošću  $R_n$  i nepouzdanošću  $Q_n$ , slijedi :

$$\text{- pouzdanost} \quad R_n = 1 - Q_n = 1 - (1 - R_0)^n \quad (7.6.)$$

$$\text{- nepouzdanost} \quad Q_n = 1 - R_n = 1 - (1 - Q_0)^n, \quad (7.7.)$$

$$\text{gdje je:} \quad 1 \geq R_0 \quad \text{i} \quad Q_0 \geq 0.$$

Povećanje pouzdanosti može se opisati sljedećim jednadžbama:

$$\Delta R_n = R_n - R_{n-1} = Q_0^{n-1} - Q_0^n \geq 0 \quad (7.8.)$$

$$\Delta Q_n = Q_n - Q_{n-1} = R_0^{n-1} - R_0^n \geq 0. \quad (7.9.)$$

U brodskom strojnom kompleksu moraju se održavati i otklanjati kvarovi iz šrafirane površine, budući da bijelu površinu (pouzdanost) treba samo nadgledati.

Sposobnost održavanja ( $M_n$ ) može se izraziti s :

$$M_n = 1 - R_o^n = 1 - (1 - Q_o)^n, \quad (7.10.)$$

a povećanje sposobnosti održavanja  $\Delta M_n$  :

$$\Delta M_n = M_n - M_{n-1} = R_o^{n-1} - R_o^n \geq 0. \quad (7.11.)$$

Veličine  $M_n$  i  $\Delta M_n$  mogu se uspoređivati kod provjere rada u održavanju i daju važnu informaciju kod održavanja pouzdanih sustava  $n$ -tog stupnja.

Potrebno je istaknuti, da veći stupanj pouzdanosti u pogonu, zahtijeva veći rad na održavanju. Isto tako, veći stupanj zalihosti sustava doprinosi povećanju pouzdanosti i veće sigurnosti, budući da  $R_n$  i  $\Delta R_n$  nemaju štetnog utjecaja, no iziskuju veće održavanje, odnosno više ljudskog rada, iako  $M_n$  i  $\Delta M_n$  također nemaju štetnog utjecaja na sustav.

Modeliranjem stupnja zalihosti od  $n = 1$  do  $n = 5$  za slučaj pouzdanosti  $R_o = 0,6$  i nepouzdanosti  $Q_o = 0,4$ , dobit će se vrijednosti prikazane u tabeli 14.

Tabela 14. Rezultat modeliranja stupnja zalihosti za  $R_o = 0,6$

| $R_o = 0,6$ |         |              | $Q_o = 0,4$ |         |              |
|-------------|---------|--------------|-------------|---------|--------------|
| $N$         | $R_n$   | $\Delta R_n$ | $Q_n$       | $M_n$   | $\Delta M_n$ |
| 1           | 0,60000 | 0,60000      | 0,40000     | 0,40000 | 0,40000      |
| 2           | 0,8400  | 0,24000      | 0,16000     | 0,64000 | 0,24000      |
| 3           | 0,93600 | 0,09600      | 0,06400     | 0,78400 | 0,14400      |
| 4           | 0,97440 | 0,03840      | 0,02560     | 0,87040 | 0,08640      |
| 5           | 0,98976 | 0,01536      | 0,01024     | 0,92224 | 0,05184      |

Smanjenjem pouzdanosti na  $R_0 = 0,5$ , te povećanjem nepouzdanosti na  $Q_0 = 0,5$  dobit će se rezultati prikazani u tabeli 15.

Tabela 15. Rezultat modeliranja stupnja zalihosti za  $R_0 = 0,5$

| $R_0 = 0,5$ |         |              | $Q_0 = 0,5$ |         |              |
|-------------|---------|--------------|-------------|---------|--------------|
| $N$         | $R_n$   | $\Delta R_n$ | $Q_n$       | $M_n$   | $\Delta M_n$ |
| 1           | 0,50000 | 0,50000      | 0,50000     | 0,50000 | 0,50000      |
| 2           | 0,75000 | 0,25000      | 0,25000     | 0,75000 | 0,25000      |
| 3           | 0,87500 | 0,12500      | 0,12500     | 0,87500 | 0,12500      |
| 4           | 0,93750 | 0,06250      | 0,06250     | 0,93750 | 0,06250      |
| 5           | 0,96875 | 0,03125      | 0,03125     | 0,96875 | 0,03125      |

Analizom dobivenih rezultata može se zaključiti da je raspon od  $\Delta R_n$  do  $\Delta M_n$  jedinstven u slučaju  $R_0 = 0,5 = Q_0$ .

Usporedbom veličina dobivenih modeliranjem stupnja zalihosti paralelnih sustava brodskih generatora, s obrađenim podacima iz baze podataka JSRIC (pogl. 5.4.2., tabele 4. i 5. i Slika 54.), može se zaključiti da se u slučaju povećanja pouzdanosti, omjer povećanja pouzdanosti  $\Delta R_n$  i povećanja sposobnosti održavanja  $\Delta M_n$  smanjuje i to osobito nakon povećanja stupnja zalihosti sa  $n=2$  na  $n=3$ , čime se dokazuje da se prednost redundantnog sustava može nepovoljno odraziti na posadu povećanim održavanjem, a time i na brodski strojni kompleks u cjelini.

Zasigurno da u današnje vrijeme niti brodovlasnik neće pristati na povećanje broja posade zbog povećanog održavanja, što olakšava odgovor na pitanje broja generatora i stupnja redundantnosti u strojnom kompleksu.

Stoga treba povećanje sigurnosti poriva broda, pronaći u povećanju pouzdanosti poboljšanjem elemenata unutar sustava (pogl. 7.4. zaključak 2.).

## 7.7. Povećanje pouzdanosti poboljšanjem elemenata unutar sustava

Razvojne službe brodogradilišta i proizvođača brodske opreme permanentno rade na poboljšanjima elemenata unutar broskog strojnog sustava, pa tako i proizvođači dizelskih generatora razvijaju sve ekonomičnije (pogon s teškim gorivom) i pouzdanije sustave za proizvodnju električne energije na brodu, integracijom većeg broja brodskih podsustava (centralni rashladni sustav). Novije analize baziraju se pretežno na sljedećim rješenjima.

### 7.7.1. Ugrađivanje akumulatora

Akumulatori su ponekad osnovni izvor električne energije na brodu (podmornice), no češće se koriste kao izvor električne energije u nuždi, kratkotrajni izvor električne energije za slučaj nužnosti, te za posebne namjene. Akumulatori velikih kapaciteta koriste se za poriv klasičnih podmornica kada su pod vodom (zbog problema ispušnih plinova dizelskih motora), a često i za pogon elektromotora kod električne propulzije iz ekoloških razloga. Akumulatori koji se koriste za električno pokretanje motora s unutrašnjim izgaranjem, mogu se postaviti u strojarnici (osim za pokretanje agregata za slučaj nužnosti) i u posebnim prostorima uz osiguranu dovoljnu ventilaciju. Mogu se koristiti i kao pomoćni izvor u kombinaciji s osovinskim generatorom, kada preuzimaju napajanje, ukoliko je osovinski generator zbog neadekvatne brzine vrtnje isključen. Svaki akumulator za pokretanje agregata treba biti dimenzioniran za struju pražnjenja koja nastaje pri pokretanju najjačeg agregata.

Ugradnja akumulatora za male potrošače električne energije mogla bi biti isplativa, ali za brodove većih kapaciteta potrošnje, bila bi neekonomična. Kod analiziranog broda *Zrinski*, ispadom generatora, odnosno nestankom električne energije, prestaje rad porivnog motora. Da bi se mogao uputiti porivni motor, morala bi postojati dovoljna količina energije u pričuvi (akumulator) za pokretanje vitalnih potrošača neophodnih za start.

Neophodni potrošači imaju instaliranu snagu:

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| - pumpa morske vode                               | 63 kW ,   |
| - pumpa slatke vode (niskotemperaturna)           | 47,5 kW , |
| - pumpa slatke vode (visokotemperaturna)          | 14 kW,    |
| - pumpa ulja za podmazivanje G.M. (cirkulacijska) | 56 kW,    |
| - pumpa ulja za podmazivanje razvodne osovine G.M | 1,4 kW.   |

|                                         |       |     |
|-----------------------------------------|-------|-----|
| - cirkulacijska pumpa goriva G.M.       | 2,9   | kW, |
| - dobavna pumpa goriva G.M.             | 0.6   | kW, |
| - ventilator za dovod zraka strojarnice | 50    | kW, |
| - ukupno opterećenje                    | 235,4 | kW. |

Za start glavnog motora potrebno je osigurati minimalno vrijeme rada navedenih potrošača. Ono se odabire na osnovi minimalnog vremena rada pumpe morske vode, prije nego što proradi zaštita G.M., a iznosi 10 minuta. Iz analize slijedi, da je potrebna energija za rad neophodnih potrošača jednaka umnošku ukupnog opterećenja i minimalnog vremena rada, odnosno

$$E = 235.4 \times 600 = 142 \quad \text{MJ} .$$

Na brodove se obično ugrađuju olovni akumulatori specifične energije između 20 i 35 Wh/kg [17], pa bi masa potrebnih akumulatora iznosila oko 1.380 kg. Budući da je potrebno dodati još 20% pričuvnog kapaciteta, slijedi da bi masa instaliranih akumulatora iznosila 1.660 kg. Takvi uređaji osim neprimjerno velike mase, zahtijevaju i permanentno punjenje i održavanje, a akumulatori napona viših od sigurnosnog i snaga iznad 2 kW, moraju biti smješteni prema zahtjevima registara, u posebne prostorije koje imaju pristup s otvorene palube, ili u odgovarajuće sanduke na otvorenoj palubi. U navedenim prostorima moraju se poduzeti sve zaštitne mjere protiv zapaljivih i eksplozivnih plinova, a prostor se mora dobro prozračivati s najmanje 30 izmjena zraka na sat. Prostori sa prisilnom cirkulacijom trebaju imati blokator uključanja punjenja, ukoliko se ne upute ventilatori, te prekid punjenja ukoliko se ventilacija zaustavi.

Zbog još niza propisa koji se moraju poštivati, ugradnja akumulatora u brodske strojne sustave većih energetske potreba, nije adekvatno i rentabilno rješenje.

### 7.7.2. Ugradnja privješениh pumpi i hidrogeneratora

Ugradnja privješениh pumpi na brodske motore, daje brodskom strojnom kompleksu velike prednosti, a samom porivnom uređaju značajnu autonomiju. Budući da pumpu ne pokreće elektromotor, smanjuje se potrošnja električne energije, investicijski troškovi (nepotrebna razvodna mreža) i troškovi održavanja.

Nažalost, ovakvo rješenje nije prikladno za sve tipove dizelskih motora, a kako se najčešće ugrađuju sporookretni dvotaktni motori s fiksnim brodskim vijkom, što podrazumijeva manevar preokretanjem motora, za ovakav tip poriva bilo bi vrlo zahtjevno ugraditi privješene pumpe. Iako su privješene pumpe pretežno zupčaste pumpe, njihova karakteristika, kao i kod centrifugalnih pumpi, budući da spadaju u grupu rotacijskih pumpi s rotacijskim prostorima, upravo proporcionalno ovisi o brzini vrtnje. To znači da je, za određeni stalni kapacitet, potrebna stalna brzina vrtnje, a promjenom brzine vrtnje mijenja se količina rashladne vode, ulja i goriva glavnog motora, što se može riješiti povećanjem broja privješениh pumpi, a da se ne spominje problem koji nastaje kod prekreta motora i promjene smjera vrtnje privješene pumpe, što opet upućuje na nužnost ugradnje privješениh klipnih pumpi, umjesto zupčanih, kod kojih smjer rotacije ne predstavlja bitan problem.

Svi se ti problemi mogu tehnički riješiti, međutim takvo rješenje umjesto da pridonosi sigurnosti poriva, zapravo čini poriv složenijim i ranjivijim. Na srednjookretnim i brzookretnim dizelskim motorima s ugradnjom reduktora i izvrstive spojke, izvedba s privješениm pumpama je danas, zbog nepostojanja problema oko prekreta uobičajena. Kod motora za pokretanje generatora, koji imaju konstantnu brzinu vrtnje i većinom su srednjookretni ili brzookretni, u pričuvi mora biti motor spreman za start i preuzimanje opterećenja u vrlo kratkom roku, pa mora biti permanentno ili povremeno podmazivan s pumpom na elektro pogon. Ukoliko je na ovakvim motorima ugrađena privješena pumpa goriva, tank goriva treba biti zbog pretlaka smješten na propisanu visinu od osovine motora, kao i kompezacijski tank vode, za privješenu pumpu rashladne vode.

Da bi pričuvni motor generator sigurnije startao, omogućena je cirkulacija tople vode iz radnog motora. Ugradnja privješениh pumpi utječe na sustave ubrizgavanja, podmazivanja, izgaranja u cilindrima i sustave ispušnih plinova, pa o navedenim čimbenicima treba voditi računa.

Tzv. inteligentni motor (pogl 3.) razlikuje se od klasičnog motora u elektronskoj kontroli motora, a na samom stroju izvedene su sljedeće promjene:

- izostavljena je razvodna osovina,
- klasične mehaničke visokotlačne pumpe goriva, zamijenjene su s elektronički upravljanim sustavom ubrizgavanja goriva koje pogoni hidraulika,
- mehanički pokretani aktuatori ispušnih ventila, zamijenjeni su s elektronički upravljanim hidrauličnim pogonom,
- ugrađena je hidraulična dobavna jedinica na samom motoru.

Cjevovod ulja za podmazivanje razvodne osovine i za dobavu ulja u sustav otvaranja ispušnih ventila, postao je nepotreban, a dodan je hidraulični sustav s hidrauličkom dobavnom jedinicom koja koristi ulje za podmazivanje kao pogonski energent. Sustav ulja na usisu u motor nije izmijenjen u odnosu na klasični motor s razvodnim osovinama, pa se ulje iz motora sakuplja u slivnom tanku smještenom ispod motora. Pumpe ulja iz slivnog tanka ulja, preko rashladnika mazivnog ulja, termostatskog ventila i automatskog filtra, s konstantnim protokom i adekvatnog tlaka, tlače ulje za podmazivanje u glavne ležajeve, odzivni ležaj, prigušivač aksijalnih vibracija, sustav hlađenja stapa i ležajeve križne glave. Iza filtera ulja, a prije ulaza ulja u motor, postavlja se priključak ulja za hidrauličnu dobavnu jedinicu. Mazivo ulje, osim osnovnih funkcija koje vrši kod klasičnih motora, kod elektronički kontroliranih motora dobiva još i funkciju pogonskog servoulja za hidraulično poganjenje vrlo bitnih komponenti motora.

Analizom hidraulične dobavne jedinice, može se zaključiti da je minimalni kontinuirani tlak ulja za upućivanje motora 200 bara, a za dobivanje tlaka, na motoru su ugrađene privješene pumpe ulja. Budući da kod prestanka rada porivnog stroja, može doći do pada tlaka u sustavu i problema kod upućivanja, sustav mora imati paralelno spojene pumpe ulja pogonjene elektromotorima.

Privješenim se pumpama ne može opsluživati čitav sustav pomoćnih službi porivnog dvotaktnog dizelskog motora, te i dalje treba navedene pumpe pogoniti elektromotorom, pa preostaje problem nestanka poriva broda kvarom konvencionalnog sustava za proizvodnju električne energije na brodu. Da bi se osigurala potrebna električna energija, potrebno je ugraditi novi sustav za dobivanje energije, koji bi se definirao pomoću bilance energije neophodnih pomoćnih uređaja. Kako u sustavu inteligentnog motora postoji mogući energent za pokretanje generatora električne energije, a to je visokotlačno ulje od 200 bara, postoji mogućnost da se u sustav ugradi hidrogenerator za proizvodnju potrebne električne energije.

Budući da pumpe usisavaju ulje iz slivnog tanka ulja porivnog motora i tlače ga u akumulator za ujednačavanje dobave ulja, nakon čega ulje pod tlakom ide u



distribuciju potrebnim potrošačima, jedan dodatni odvojak u distribuciji, mogao bi se koristiti za pokretanje hidrogeneratora (Slika 83.). Međutim, u takvoj izvedbi trebao bi se predvidjeti veći generator u nuždi, čija bi snaga morala biti uvećana za pokretanje hidrauličnih pumpi u nuždi. Time bi se izazvala promjena kapaciteta hidrauličnih privješene pumpi te akumulatora, što bi se odrazilo na sam hidrogenerator.

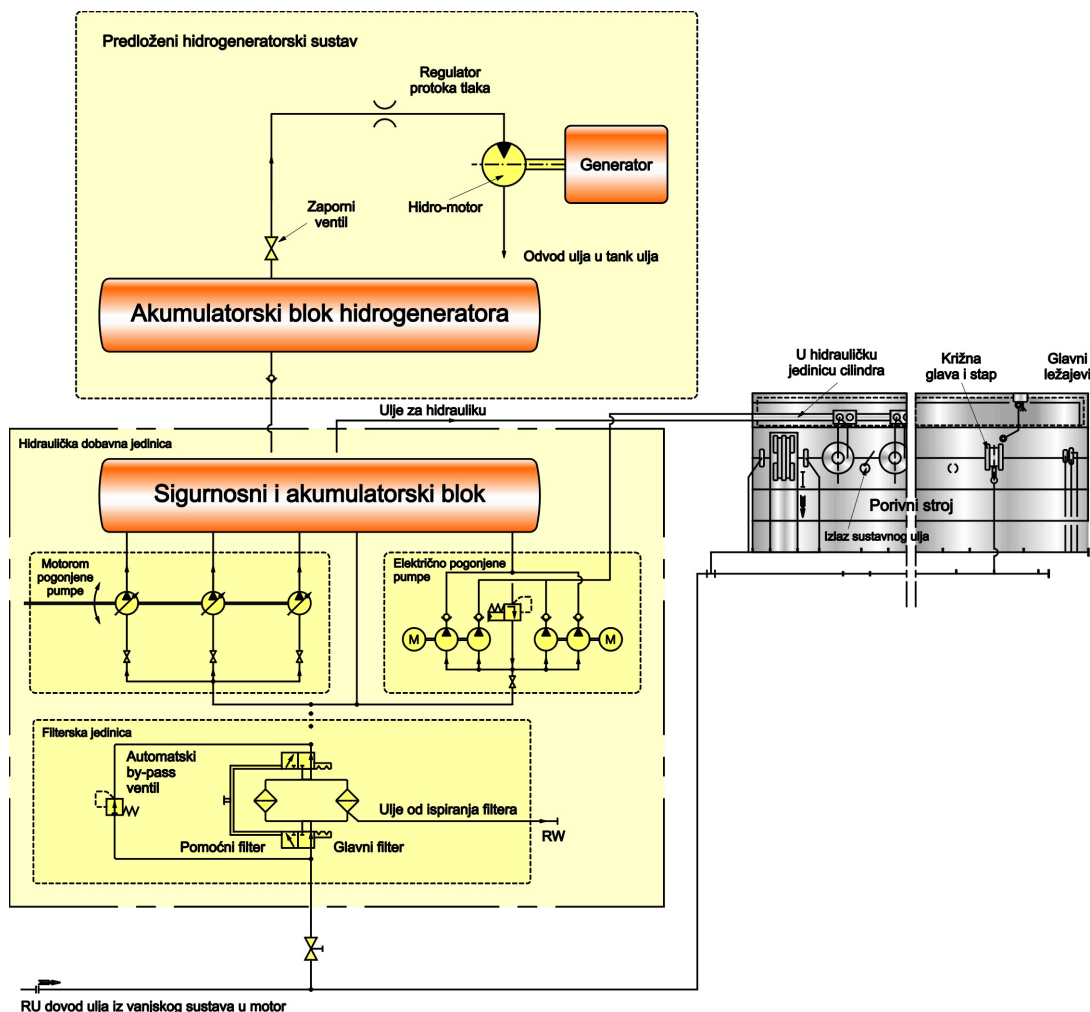
Hidraulična dobavna jedinica sastoji se od:

- automatskog samočistivog filtra ulja, paralelno spojenog s pomoćnim filtrom,
- dvije električno pogonjene pumpe,
- tri privještene pumpe na porivni stroj,
- jedna akumulatorska jedinica.

Prednost uporabe sistemskog ulja motora kao radnog medija hidraulike, očituje se u izostanku odvojenog sustava hidrauličnog ulja, a time su izbjegnuti dodatni tankovi, rashladnici, dobavne pumpe, armatura i cjevovodi. Za pouzdan rad hidraulično dobavne jedinice sustava, neophodno je ulje održavati čistim, pa se mora dodatno pročišćavati automatskim samočistivim 6 $\mu$  filtrom, smještenim u dobavnom vodu za hidrauličnu jedinicu koja se odvaja s glavne cijevi mazivnog ulja motora. Postojeći priključak RW je izlaz nečistoće iz automatskog filtra s povratnim ispiranjem. S gledišta sustava ulja motora, sistem djeluje kao "by pass" filtriranje, pa slijedi da će tijekom vremena čitava količina ulja proteći kroz fini filter, te ulje motora postaje još čišće. Pri upućivanju porivnog motora aktivira se električno pogonjena pumpa i tlači ulje u hidraulični sustav, sve dok dobavu ne preuzmu privještene pumpe pogonjene porivnim motorom.

Hidrauličko ulje se pod tlakom dobavlja u sigurnosni, akumulatorski blok iz kojega se ulje distribuira u hidrauličnim pogonskim jedinicama. Dodatno bi se u sustav ugradio nepovratni ventil i akumulatorski blok hidrogeneratora, u koji bi se akumuliralo ulje pod tlakom od 200 bar za pokretanje hidrogeneratora, a nepovratni ventil bi spriječio povratak ulja u dobavni sustav i pražnjenje akumulatora. Hidroakumulator je uređaj koji služi za akumuliranje energije radnog medija (ulja) kojega daje hidraulična dobavna jedinica. Akumuliranu hidrostatsku energiju moguće je uporabiti za pokretanje hidrogeneratora, s optimalnim tlakom ulja za rad hidromotora od oko 50 bara, pa bi se u sustav morao ugraditi regulator tlaka i protoka medija ispred hidrauličnog motora.

Da bi se osigurao zadovoljavajući rad novog sustava, potrebno je uvesti kvantitativnu mjeru funkcionalnosti sustava, da bi se spriječila njegova degradacija, što rezultira sljedećim mogućim scenarijem.



Slika 83. Model ugradnje hidrogeneratora u sustav porivnog stroja

Tijekom rada porivnog motora doći će do maksimalnog punjenja (200 bar) predviđenog novougrađenog akumulatora. Cjelokupni hidraulički sustav predstavlja skup energetske uređaja za proizvodnju, razvod i potrošnju, tijekom rada porivnog motora s pripadajućim funkcijama sustava za automatsko upravljanje i vođenje, sada s još jednom funkcijom paralelnog punjenja i nadopunjavanja novog akumulatora. Kada novi akumulator dostigne maksimalni tlak sustava, nije ga više potrebno puniti, ukoliko nema propuštanja, što znači da je stalno u pričuvi za startanje hidrogeneratora. Radom hidrogeneratora nastaje pad tlaka u akumulatoru i u cjelokupnom dobavnom sustavu, što bi negativno djelovalo na upućivanje porivnog motora, budući je za startanje potreban visoki tlak ulja od 200 bara. Kako bi se to izbjeglo, nužno je ugraditi automatski prekid protoka između postojećeg akumulatora i novougrađenog akumulatora, pri startanju hidrogeneratora.

Najveći problem kod postavljanja predloženog modela predstavlja veličina dodatnog akumulatora. Akumulatori koji bi najbolje zadovoljili tražene zahtjeve su s plinskim punjenjem, kod kojih su mediji odvojeni klipom ili dijafragmom, koji pri većim volumenima izazivaju poteškoće, pa se preporuča maksimalni volumen do 500 litara. Problem bi se mogao izbjeći ugradnjom više akumulatora, koji bi zauzimali relativno veliki volumen, što se vrlo nepovoljno odražava na veličinu brodske strojarnice.

S predloženim sustavom nesumnjivo bi se mogao uputiti i kratkoročno opskrbljivati porivni motor, međutim za sigurno startanje i dulji rad, bila bi potrebna veća količina radnog medija za rad hidrogeneratora. Prikazani hidraulični sklop predstavlja skup složenih energetske uređaja porivnog motora, što definirani model čini parcijalnim, a rezultati istraživanja ukazuju da je akumulativna energija hidraulike konstantna dok motor radi, međutim upotrebom hidrogeneratora ova energija se troši i vremenski je ograničena, što iziskuje povećanje kapaciteta hidroakumulatora. U sustavu hidraulike, pumpu hidraulike pri upućivanju porivnog stroja pokreće elektromotor, što upućuje na povećanu potrebu za električnom energijom, a sam hidrogenerator bi morao biti uvećan za snagu pumpe hidrauličnog sustava. Ovakvo rješenje podsustava hidraulike bilo bi skupo i neekonomično zbog velikih dimenzija akumulatora i niskog stupnja iskoristivosti hidraulike, a sam sustav bio bi nedovoljno siguran zbog mogućnosti propuštanja i pada tlaka, koji bi negativno utjecao na ugrađeni hidrogenerator, čime bi se povećalo održavanje cjelokupnog sustava. Problem se svodi na dinamičku promjenu hidrauličnog toka, budući da radom hidrauličnog generatora dolazi do pada tlaka u hidrauličnom akumulatoru, što rezultira vremenskim ograničenjem dobivanja električne energije. Kod analize mogućnosti definiranja vremena rada hidrogeneratora do startanja porivnog motora, kao i tijekom rada porivnog motora, kako permanentno dobivati električnu energiju do prve luke za popravak ili zamjenu dizelskog generatora, nailazi se na niz problema koje je vrlo teško definirati, pa bi bilo idealno kada bi se mogla zanemariti vremenska komponenta rada hidrogeneratora, što je u praktičnom slučaju neizvedivo. Stoga se u ovom istraživanju napušta ideja definiranja modela sigurne propulzije ugradnjom hidrogeneratora s privješnim pumpama na porivnom motoru i teži za boljim rješenjem.

Razrada ove ideje može povećati sigurnost i raspoloživost broskog strojnog kompleksa, no isto tako treba voditi računa da su sustavi novih inteligentnih motora još u razvoju i da u novim generacijama motora može doći do bitnih izmjena sustava, što se može odraziti na mogućnost primjene privješnih pumpi ili hidrogeneratora.

### 7.7.3. Model pomoćne propulzije s osovinskim generatorom

Jedan od mogućih načina realizacije pomoćne propulzije je pomoću dizelskih generatora, koji u primarnoj propulziji broda opskrbljuju brod električnom energijom. Kvarom glavnog porivnog stroja brod ostaje bez poriva. Ukoliko pomoću spojke odvojimo motor od osovinskog voda s vijkom sa zakretnim krilima i na njega priključimo tzv. PTI<sup>25</sup> motor (elektromotor), koji je ujedno i osovinski generator PTO<sup>26</sup>, ostvarili smo sustav pomoćne (redundantne) propulzije. Potrebnu energiju (električnu) za poriv broda proizvode pomoćni motori (dizelski generatori), koji preko PTI motora, odzivne i električne spojke i dvostupanjskog reduktora s paralelnim osovinama, prenose porivnu silu na osovinski vod.

Reduktor ujedno prenosi dio snage porivnog stroja preko spiralnog uređaja za povećanje brzine (multiplikatora) osovinskog generatora (PTO) ili prenosi snagu s elektromotora (PTI režim rada) na osovinski vod kada je glavni motor odspojen. Ulazna osovina reduktora (Slika 84.), međuosovina i višebrzinska osovina izvedene su paralelno u kućištu reduktora. Zbog spoja na ulaznoj strani, višebrzinska se osovina okreće sve dok je multidisk spojka ukopčana. Na jednu od osovina privještene su hidraulične pumpe za podmazivanje i hlađenje reduktora, te za spajanje multidisk spojke, sve dok porivni stroj radi. Kod prijelaza na PTI sustav, starta pričuvna (stand by) pumpa pogonjena elektromotorom.

Osovinski generator ugrađen u sustav osovinskog voda s vijkom sa prekretnim krilima je jednostavnije i pouzdanije rješenje od sustava sa fiksnim brodskim vijkom. U generatorskom režimu rada (PTO), sustav bi mogao raditi i s fiksnim brodskim vijkom, budući da bi se konstantan napon i frekvencija kod promjenljive vrtnje glavnog motora mogao ostvariti statičkim pretvaračem frekvencije. Međutim, ukoliko se u sustav uvede pomoćna propulzija (PTI), više se ne može koristiti fiksni vijak, budući da se krila prekretnog vijka mogu postaviti u nulti položaj, pa se PTI sustav može "mekano" priključiti na neopterećeni osovinski vod. Priključenje PTI sustava na fiksni brodski vijak izazvao bi preopterećenje PTI elektromotora.

Kod odvajanja porivnog stroja od osovinskog voda, veliku ulogu ima odzivna spojka, koja prenosi snagu s motora na osovinski vod pomoću hidraulične spojke, a u slučaju pomoćne propulzije vrši ulogu odzivnog ležaja. Osovina broskog vijka opskrbljena je sigurnosnom kočnicom protiv okretanja, koja omogućava da se rastavna spojka uključi/isključi u stanju mirovanja. Tunelski uređaj je dvobrzinski i omogućava promjenu sa PTO na PTI režimu rada.

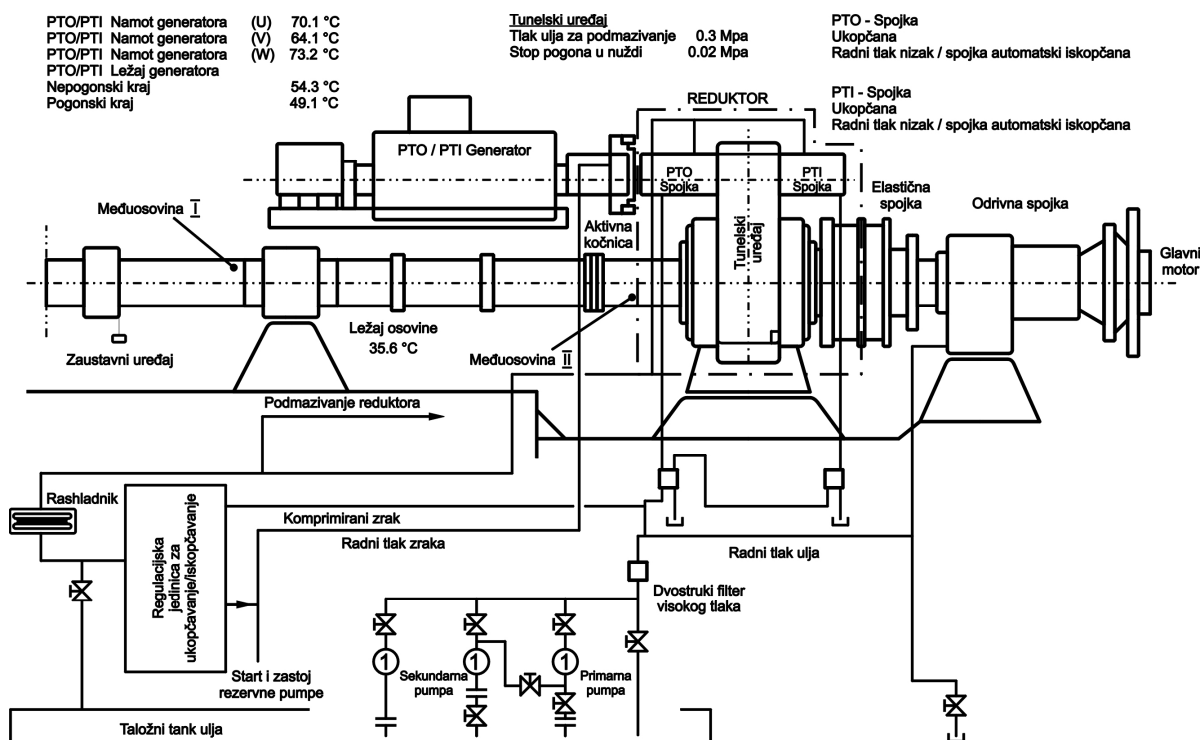
---

<sup>25</sup> PTI - Power Take care In - Uređaj za dodavanje dijela snage

<sup>26</sup> PTO - Power Take care Off - Uređaj za oduzimanje dijela snage

Ugrađene su hidraulične PTI spojke, te električna spojka između osovine i PTO/PTI generatora. U odvojenom radu spojka se slobodno okreće na ležajevima od kojih jedan prenosi moment brodskog vijka tijekom pomoćne propulzije na odzivni ležaj.

Sustav ulja opskrbljen je primarno/sekundarnom i pričuvnom pumpom ulja, koje tlače ulje u sustav podmazivanja PTO/PTI uređaja, električne i odzivne spojke te u regulacijsku jedinicu, kao i u sustav za podmazivanje reduktora.

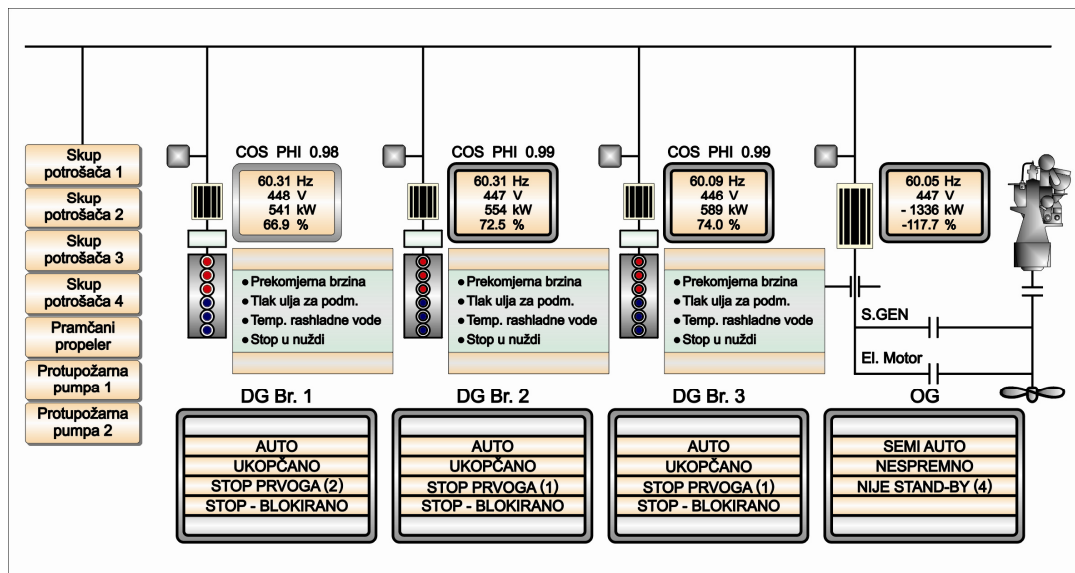


Slika 84. PTO/PTI sustav redundantne propulzije

Sustav komprimiranog zraka aktivira kočnice između osovinskog generatora i reduktora. Svaki od spomenutih dizelskih agregata posjeduje zaštitu od prevelike brzine vrtnje, tlaka ulja za podmazivanje, temperature rashladne vode te funkciju stop u nuždi.

Automatika svakog agregata (Slika 85.) omogućuje da u slučaju pomoćne propulzije, odnosno pogona preko PTI elektromotora, budu sva tri pomoćna motora u radu i da se PTI motor upušta u rad nakon postizanja sinkrone brzine elektromotora. Isto tako omogućen je određeni redoslijed zaustavljanja agregata, kao i start "stand by" dizelskog agregata u slučaju generatorskog rada osovinskog generatora, koji nije "stand by", budući da je paralelan rad osovinskog generatora moguć samo kratkotrajno.

Sva tri dizelska agregata u paralelnom radu proizvode električnu energiju za start PTI elektromotora i tzv. *pony* motora (Slika 84.), koji služi za uzbuđivanje PTI motora. Kada on dostigne sinkronu brzinu vrtnje, poni motor prestaje s radom.



Slika 85. Automatika pomoćnih dizelskih agregata

Uvjeti za start *pony* motora ostvaruju se pripremom cijelog PTI sustava za rad, odnosno :

- odzivna spojka je ukopčana, glavni motor je odvojen od osovinskog voda,
- PTI i PTO spojka iskopčana (reduktor odvojen od PTI motora ),
- kočnica između PTI motora i reduktora otpuštena,
- brodski vijak s zakretnim krilima postavljen u tzv. nulti položaj,
- tri dizelska generatora su u paralelnom radu.

Start *pony* motora ostvaruje se direktnim spajanjem asinkronog motora preko sklopnika na mrežu. Istovremeno se vrši razbuda PTI motora, kako bi se olakšao i ubrzao start PTI motora. Prilikom uključivanja PTI spojke, PTI motor treba ubrzati zamašne mase reduktora, osovinskog voda i brodskog vijka. Stoga porast prijenosnog momenta spojke mora ići postepeno, kako u suprotnom ne bi udarno opterećenje PTI motora izazvalo veliki pad frekvencije brodske mreže, ili što je još gore, ispad PTI motora iz sinkroniziranosti. Kada je startanje uspjelo, moguće je postepeno opterećivati PTI motor zakretanjem krila brodskog vijka. Zaustavljanje pomoćne propulzije također zahtjeva postepeno rasterećenje zakretanjem krila brodskog vijka.

Iz analize je vidljivo da je preko osovinskog generatora moguća pomoćna propulzija broda, što uvelike povećava sigurnost kompletnog brodskog sustava (pogl. 7.4.), pa je to svakako dobar razlog za ugradnju opisanog kompliciranog sustava u brodski strojni kompleks.

Međutim, još nije dan zadovoljavajući odgovor na mogućnost redundantne propulzije u slučaju kompletnog nestanka električne energije na brodu, što na kraju dovodi do nestanka brodskog poriva, a u poglavlju 5.4. dokazano je da dominantnu ulogu u kvarovima u brodskom strojnom kompleksu zauzimaju kvarovi dizelskih generatora.

## 7.8. Model pouzdanog pogona

Iz prethodne analize vidljiv je nedostatak pouzdanosti brodskog strojnog kompleksa u slučaju kvara dizelskog generatora, odnosno nestanka električne energije na brodu. Prema propisima registara svaki brod s vlastitim porivom treba imati izvor električne energije za slučaj nužnosti, koji služi za napajanje najvažnijih trošila, kada nestane napona u sabirnicama glavne sklopne ploče.

Na teretnim brodovima veće nosivosti potrebno je osigurati permanentno napajanje tijekom 18 sati kormilarskog sustava, nužne rasvjete, pozicijskih svjetala, radio opreme, navigacijske opreme, sredstava unutarnje veze, sustava dojava požara, te na zahtjev registra još eventualno dodatnih potrošača, kao što je kaljužna pumpa, protupožarna pumpa itd. Kao izvor električne energije u nuždi koristi se dizelski generator, koji mora kada nestane napona na glavnoj sklopnoj ploči, automatski startati, priključiti se na sklopnu ploču za nužnost i preuzeti opterećenja za navedena trošila unutar 45 sekundi. Također treba biti osigurano pouzdano pokretanje generatora, tako da sustav za pokretanje mora imati zalihu energije dovoljnu za najmanje tri uzastopna pokretanja, kao i alternativni način pokretanja koji može biti ručni ili pomoću nekog drugog izvora energije, koji mora omogućiti napajanje tri uzastopna pokretanja dizelskog generatora u roku od 30 minuta. Neophodna oprema i sam agregat trebaju biti smješteni u prostoriji iznad najviše neprekinute palube i iznad grotla strojarnice. Izlaz iz prostorije treba voditi neposredno na otvorenu palubu, a sama prostorija ne bi smjela graničiti s prostorijama u kojima se nalaze glavni izvori električne energije.

Jedna od mogućnosti za povećanje pouzdanosti brodskog strojnog kompleksa, gotovo da se nameće sama od sebe, a to je povećanje snage dizelskog generatora u nuždi i to za energiju potrebnu za upućivanje i održavanje sustava porivnog motora. Rješenje bi bilo vrlo jednostavno, pa je analizirana mogućnost takvog rješenja na više tipova brodova izgrađenih u domaćim brodogradilištima. Nakon temeljite analize dolazi se do zaključka koji ne idu u prilog spomenutom rješenju.

Primjena prikazanog modela na referentnom brodu *Zrinski*, dovela bi do sljedećih rezultata. Iz tablice bilance električnog opterećenja, vidljivo je da dizelski generator u nuždi mora imati snagu od 204 kW, te je odabran dizelski motor "MAN B&W", tip DO 226 MTE. Motor je četvorotaktni s  $1.800 \text{ min}^{-1}$  i daje potrebnu snagu s naponom od 450 V (3 faze) s frekvencijom od 60 Hz. Nestankom električne energije na brodu, prestaje rad porivnog motora (pogl. 7.6.) Da bi se motor ponovo uputio, potrebno je pokrenuti neophodne potrošače. Za to je potrebno 235,4 kW. Da bi se zadovoljili propisi registra za dizelski generator u nuždi, morao bi se ugraditi motor snage 440 kW, što predstavlja više od dvostruko veću snagu od instalirane i naravno puno veći generator. Kako



motor mora imati mogućnost neprestanog rada najmanje 28 sati, bilo bi potrebno ugraditi tank od oko 2.000 litara nafte, a sve to treba smjestiti u zasebnom već opisanom prostoru, koji mora biti adekvatno izoliran od buke i vibracija. Naravno da je takav agregat i teže pokretati, a osobito ukoliko se računa na mogućnost manualnog alternativnog pokretanja. Sve to jako komplicira naoko jednostavno rješenje. Usprkos tome glavna prednost ovakvog rješenja uvijek ostaje, a to je u velikoj mjeri povećana pouzdanost. Pitanje je samo, da li postoji neko drugo prihvatljivije rješenje, koje bi dovelo do istog rezultata.

### 7.8.1. Model predlaganog pogona

Iz dosadašnje analize došlo se do zaključka da predloženi sustav mora biti dio visokointegriranog sustava porivnog postrojenja, a ne nekakva izdvojena cjelina. Veliki nedostatak mogućeg rješenja preko dizelskog generatora u nuždi je i velika udaljenost između prostorije generatora i same strojarnice broda.

Dakle, predloženo rješenje mora se prilagoditi karakteristikama porivnog motora i zahtjevima ekonomičnosti ugradnje, održavanja te skupocjenosti broskog prostora.

Prvo svakako treba ustanoviti bilancu električne energije za pokretanje i rad sustava potrebnih za normalan rad glavnog motora. Analizirajući pomoćne sustave dvotaktnih dizelskih motora (pogl. 4) vodećih kompanija MAN; B&W i Wartsila (Sulzer), dolazi se do saznanja da je moguće izraditi jedinstveni model pomoćnih sustava glavnog motora.

Potrošači koje treba opskrbiti energijom su pumpe morske vode (M), pumpa slatke vode niske temperature (NT), pumpa slatke vode visoke temperature (VT), pumpa ulja glavnog motora (U), pumpa ulja za podmazivanje križnih glava (UK), dobavna pumpa goriva (G) i protočna pumpa goriva (PG). Na temelju prikazanih parametara u katalozima proizvođača motora, proračunati su protoci morske vode, nisko i visokotemperaturne slatke vode, ulja za podmazivanje i potrebna količina goriva, te izrađeni dijagrami protoka i snaga. Na osnovi dijagrama na slici 36. definira se snaga pumpe mora, dijagrama na slici 39. snaga pumpi slatke vode, dijagrama na slici 43. snaga pumpe ulja za podmazivanje motora i križne glave, te dijagrama na slici 45. snaga cirkulacijske i protočne pumpe goriva.

Potrebna ukupna snaga za pokretanje pomoćnih sustava porivnog motora je:

$$P = P_M + P_{NT} + P_{VT} + P_U + P_{UK} + P_G + P_{PG} \quad [\text{kw}].$$

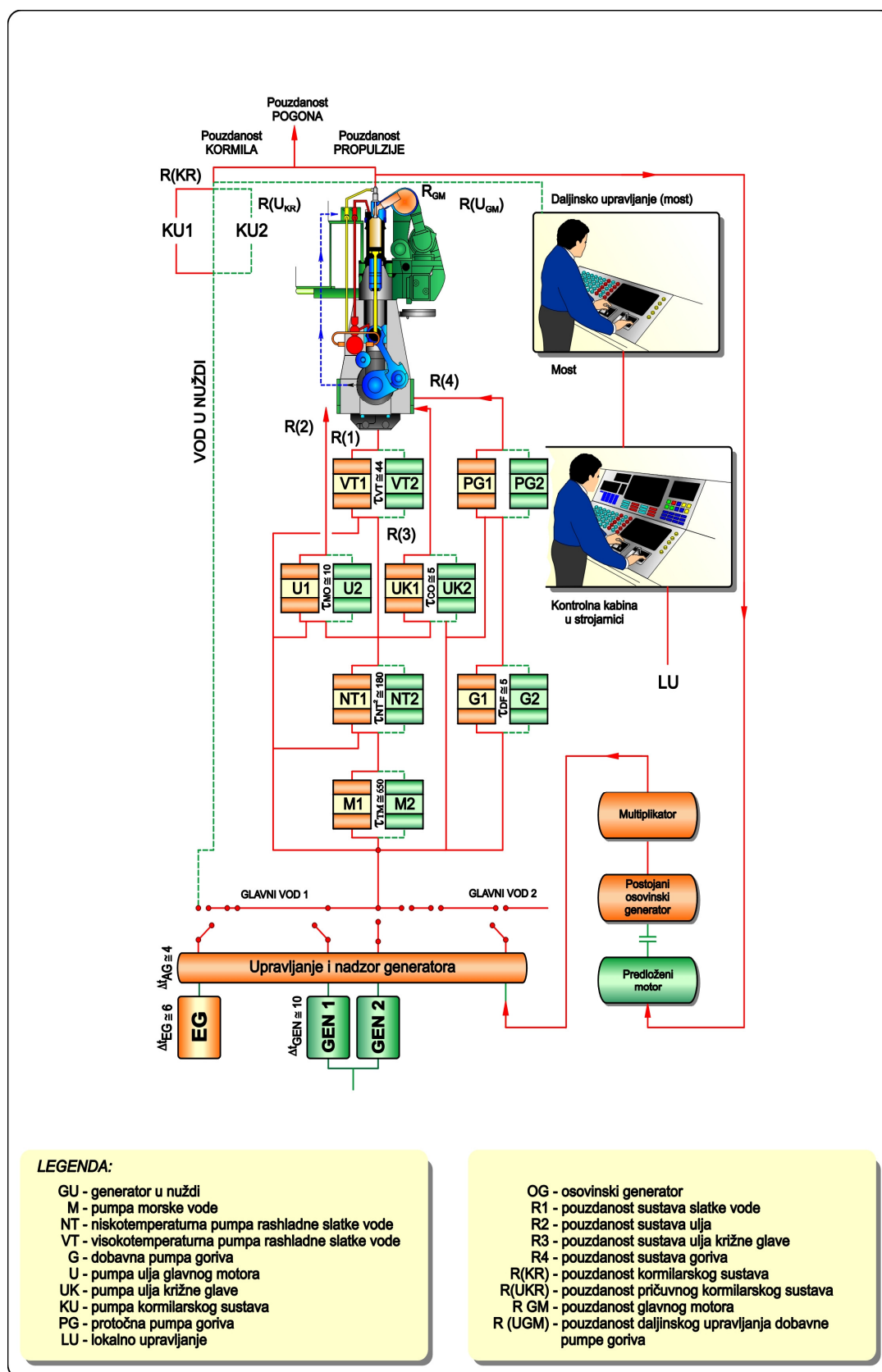
Proračunata snaga potrebna je za definiranje pomoćnog motora u nuždi za pokretanje sustava i opsluživanje porivnog stroja. U klasičnoj izvedbi, motor bi bio opskrbljen generatorom i svim potrebnim dodatnim uređajima, pa nastaje problem prostora za smještaj i ukrućenja, manipulacije i održavanja. Stoga bi rješenje moglo biti izvedeno preko već postojećeg osovinskog generatora. Na postojeći osovinski generator mogao bi se spojiti dizelski motor odgovarajućih parametara, koji bi bio u pogonu samo u kritičnom stanju potpunog nestanka električne energije na brodu (Slika 86.).

Osovinski generator se ugrađuje na bočnoj strani motora, te postaje integralni dio motora. Ugradnja predloženog motora na osovinski generator bila bi jednostavna, u produžetku s osovinom generatora i elastičnom spojkom (Slika 87.). Kada je osovinski generator u normalnom radu pogonjen porivnim strojem, fiksno je povezan s uređajem konstantne frekvencije, te fleksibilnom spojkom na motoru. Nestankom električne energije, prestaje rad pomoćnih sustava glavnog motora, pa zaštita motora zaustavlja motor. Ukoliko je nemoguće pokrenuti dizelske generatore, u kratkom razdoblju automatski starta generator u nuždi i ukopčava neophodne potrošače.

Potrebnu "dodatnu" električnu energiju za ponovno upućivanje i opsluživanje glavnog motora, dobit će se startanjem predloženog motora i osovinskog generatora u rad. Za start motora potrebno je iskopčati električnu spojku između generatora i uređaja konstantne brzine vrtnje i ukopčati spojku između osovinskog generatora i predloženog motora. Upućivanje samog motora može biti izvedeno automatski ili lokalno sa samog motora i to pomoću uputnog zraka ili akumulatora. Motor ima privještene pumpe ulja, goriva i rashladne vode, a sustav goriva se može spojiti s tankovima lakog goriva pomoćnih motora, te nije potreban dodatni tank. Sustav rashladne vode bio bi povezan s nadoljevnim tankom slatke rashladne vode dizelskog generatora, a ulje za podmazivanje je u karteru motora i cirkulira pomoću privještene pumpe i rashladnika ulja.

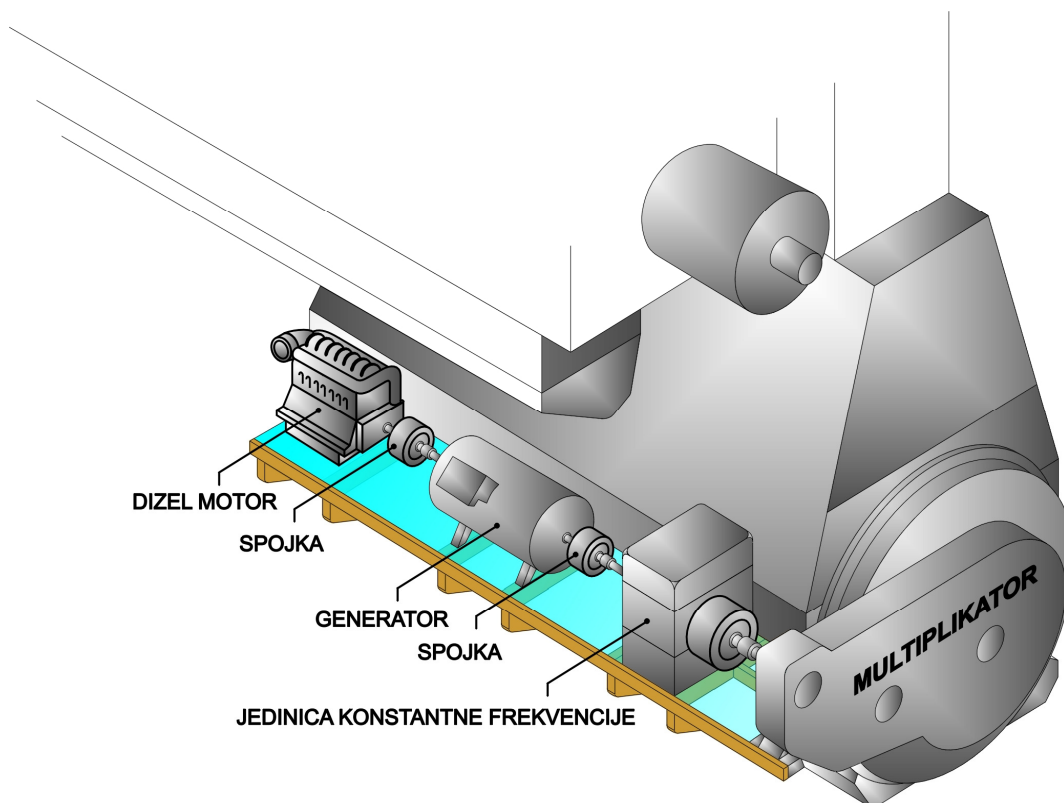
Radom osovinskog generatora, pogonjenog s dizelskim motorom, dobiva se potrebna električna energija za pokretanje sustava glavnog motora. Nakon adekvatno dobivene snage i napona na sklopnoj ploči, po redosljedu se starta pumpa ulja za podmazivanje glavnog motora i križnih glava, zatim pumpa morske vode, te pumpa rashladnog sustava slatke vode niske i visoke temperature i na kraju cirkulacijska pumpa lakog goriva. Time je glavni motor spreman za upućivanje zrakom, kojeg zbog strogih zahtjeva registra ima u dovoljnoj količini, te nije potrebno osigurati dodatnu energiju za rad kompresora zraka.

Glavni motor se upućuje postepeno, povećava mu se brzina vrtnje dok se ne dostigne optimalan učin motora, koji se u većini slučajeva kreće na 85 % brzine vrtnje motora.



*Slika 86. Model predlaganog pouzdanog pogona*

Postizanjem konstantnog opterećenja i brzine vrtnje prebacuje se sustav proizvodnje električne energije preko osovinskog generatora na glavni motor, čime glavni motor sam sebe opskrbljuje dovoljnom količinom energije za nesmetani rad.



Slika 87. Ugradnja osovinskog generatora s predloženim motorom

Za montažu predloženog sustava (Slika 87.), potrebno je uz opisane uređaje produljiti postolje osovinskog generatora po boku porivnog motora. Time cjelokupni sustav zauzima vrlo mali prostor, što je u brodskom strojnom kompleksu vrlo važan čimbenik. Ovako koncipirani sustav bio bi vrlo prikladan za rukovanje i održavanje. Cijena dodatnog postrojenja neznatna je u usporedbi s tegljenjem broda u slučaju kvara postojećeg postrojenja (poglavlje 7.4.).

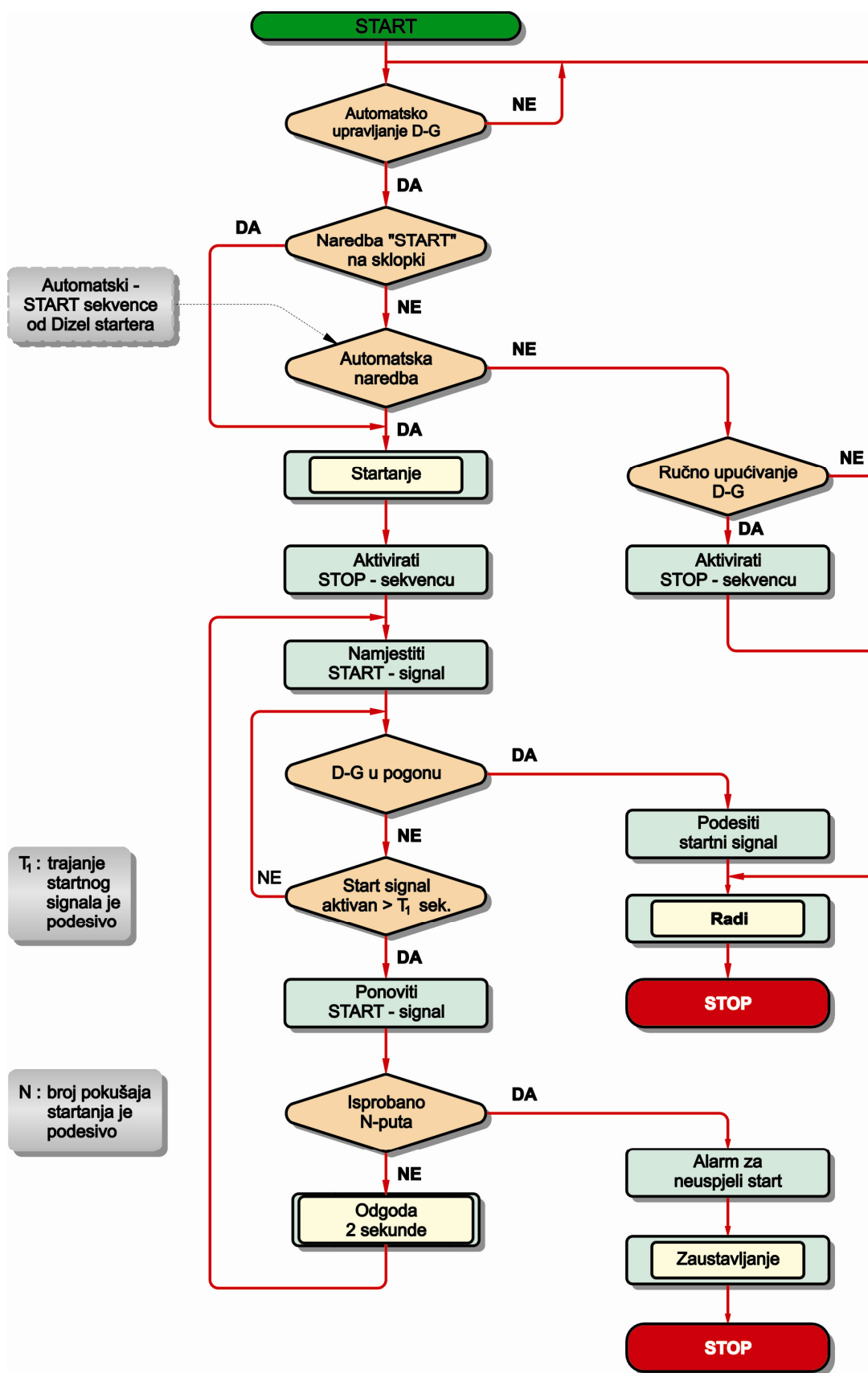
### 7.8.2. Kvar dizelskog generatora tijekom poriva

Sustavi dizelskih generatora vrlo su složeni i sastoje se iz velikog broja različite opreme i elemenata. Iako je njihova pouzdanost velika, u ovom kompleksnom sustavu postoji mnogo mogućnosti nastajanja kvara. Kod preopterećenja brodske mreže zbog ispada generatora radi preopterećenja ili kvara, automatski se pokreće start i pogon pričuvnog agregata koji se, kako je to već opisano, selektivno i postupno uključuje na sabirnice sklopne ploče uz prethodnu regulaciju napona, frekvencije i sinkronizacije. Osobito je pritom važno upravljanje dizelskog motora kao primarnog pokretača generatora, što u užem smislu podrazumijeva proces automatskog startanja, programskog vođenja u nominalnom režimu, regulacije brzine vrtnje i automatsko zaustavljanje.

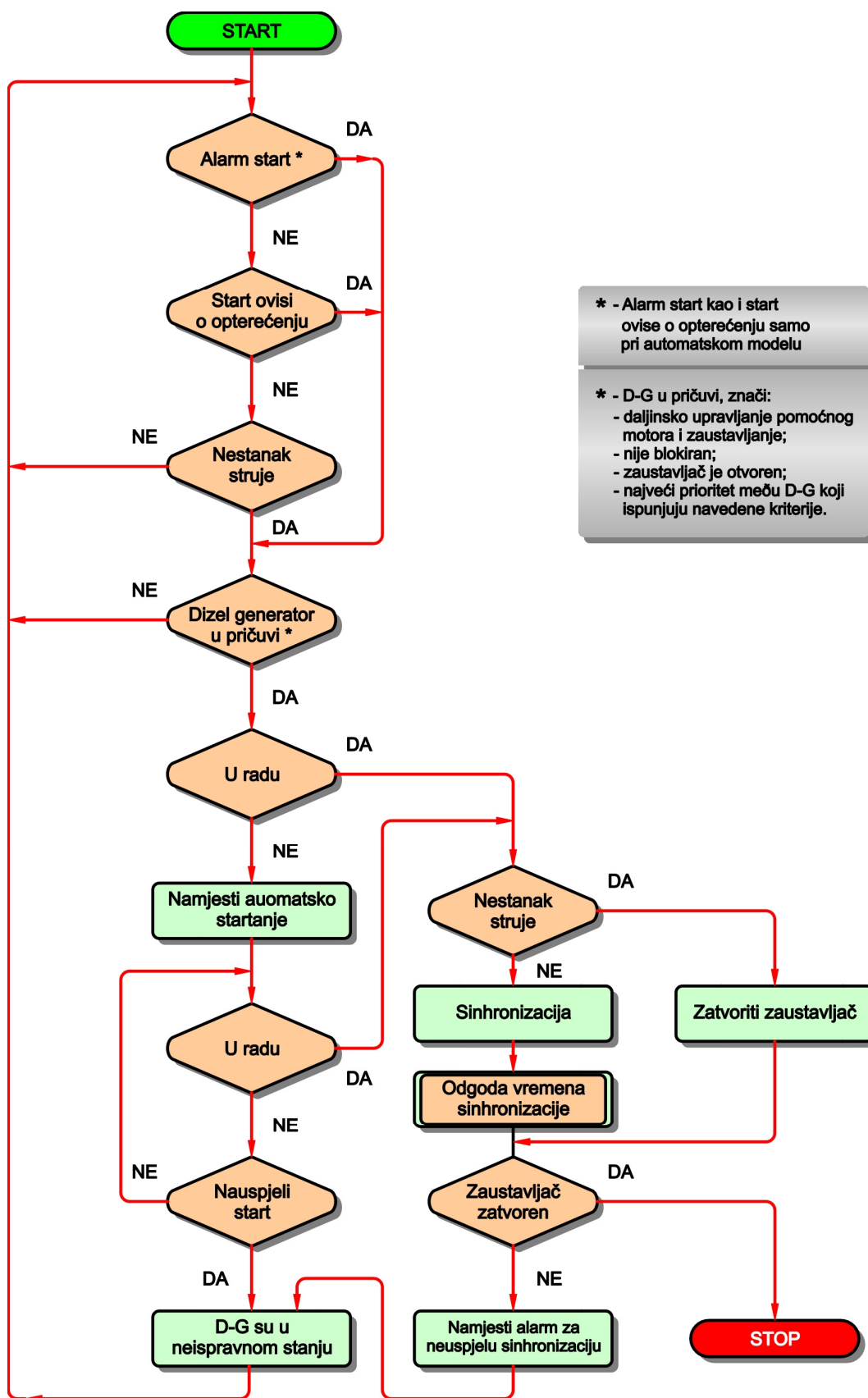
Upravljanje električnom energijom uključuje i njenu razdiobu i potrošnju, budući da se proizvodi samo onda i samo toliko, kada i koliko energije zahtijevaju trošila. Kod automatiziranih sustava mogu postojati razlozi zbog kojih se želi (katkada i mora) uključiti osoblje u upravljanje, pa obično i najsuvremenija rješenja imaju mogućnost ručnog režima rada, te se zahtijeva odabir ručnog upućivanja dizelskog generatora (s mjesta ugradnje) ili daljinsko automatsko upravljanje. Ugrađena automatika i informatika pri smetnjama i nepravilnostima, u bilo kojem dijelu brodskog električnog postrojenja, poduzimaju sve potrebne mjere da se barem važna trošila kontinuirano napajaju električnom energijom i istovremeno sprječavaju proširenje smetnje. Osim ovog sigurnosnog zadatka, automatizacija djeluje na ekonomičnost pogona uštedom goriva i uključivanjem samo onoliko agregata koliko je potrebno da se pokrije opterećenje brodske mreže. Ukoliko se u normalnoj plovidbi brodski strojni sustav napaja električnom energijom samo iz jednog agregata, u slučaju njegovog preopterećenja ili kvara i ispada iz pogona, uključuje se alarm koji automatski djeluje na sustav upućivanja agregata u pričuvi (koji se po propisima registra mora stalno održavati u stanju pripravnosti za start), priključenje tog agregata na mrežu i automatsko opterećenje (Slika 88.). Unatoč tome, moguće je da kod automatskog pokretanja prvi start ne uspije, pa je predviđeno automatsko ponavljanje pokretanja. Ukoliko i tada ne uspije start, dojavljuje se da se agregat ne može pokrenuti "black – out" (Slika 89.).

Dizelski generator u pričuvi može ispravno raditi ili biti u neispravnom stanju. Kada je u neispravnom stanju, javlja se nestanak napona na sabirnicama ("black – out"), pa sva trošila spojena na mrežu ostaju bez električne energije. Tada mora brzo startati agregat u nuždi i selektivno se opterećivati, no usprkos tome dolazi do zaustavljanja porivnog stroja, pa brod ostaje bez poriva. Ukoliko kvar na generatorima nije moguće otkloniti, brod treba tegliti.

Ugradnjom predloženog modela, bilo bi moguće da brod na vlastiti pogon dođe do luke za popravak generatora.



Slika 88. Dijagram toka startanja i rada dizelskog generatora

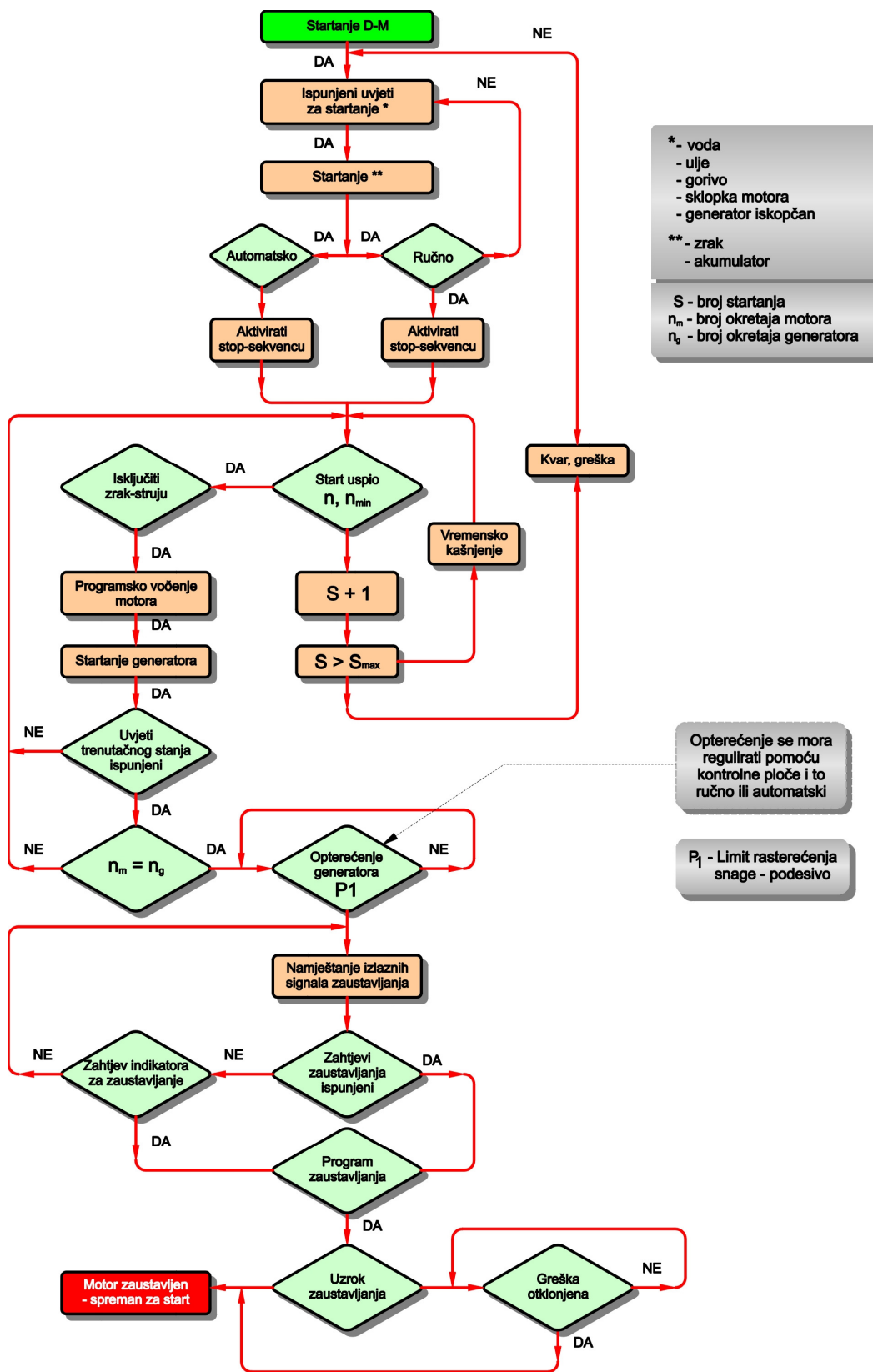


179

### 7.8.3. Model upravljanja i opterećenja predloženog rješenja

Za upućivanje motora služi komprimirani zrak ili akumulator. Motor ima mogućnost automatskog i ručnog upućivanja, čime se zasigurno zadovoljava zahtjev registara, iako je predloženo rješenje novo, pa ga normalno nije do sada razmatrao registar (Slika 90.). Glavni program starta inicijalizacijom sustava upravljanja i postavljanjem početnih parametara. Ukoliko postoji zahtjev za ručno upravljanje, aktivnost sustava upravljanja i nadzora svodi se samo na analizu parametara i nadzor dizelgeneratorskog kompleksa, te dojava alarmnih stanja. Automatsko upravljanje dizelgeneratorske jedinice u cjelini ne isključuje, niti u najmanjoj mjeri degradira ručno upravljanje, koje mora osigurati potpuno upravljanje svim relevantnim funkcijama brodske električne sklopke. Nakon uspješnog upućivanja motora, slijedi faza njegovog programskog vođenja u normalan radni režim. Programsko se vođenje ostvaruje povećanjem brzine vrtnje uz provjeravanje vrijednosti parametara relevantnih za ispravan i siguran rad motora. Kada motor postigne optimalnu brzinu vrtnje, ukopčava se osovinski generator koji u tom trenutku nema opterećenja, te dolazi do male promjene gradijenata brzine vrtnje. Tijekom odvijanja programa, provjeravaju se uvjeti trenutnog stanja motora i ako neki od njih nije ispunjen (nizak tlak ulja, povišena temperatura rashladne vode itd.), motor se vraća u sigurnosni režim koji je unaprijed definiran. Ukoliko su uvjeti trenutnog stanja ispunjeni, uspostavlja se normalni režim rada, nakon čega slijedi program regulacije brzine vrtnje, koji mora ostvariti istu brzinu vrtnje motora  $n_m$  i generatora  $n_g$ , a ukoliko to ne uspije, vraća motor u sigurnosni režim rada. Slijedi postepeno opterećenje generatora, uključivanjem potrošača na mreži, gdje se posebna pozornost mora posvetiti sinkronizaciji i uključivanju u paralelan rad dizelgeneratorske jedinice u okviru brodske električne centrale i mreže, te upakčanju potrošača sistemom pojedinačne sinkronizacije i stabilizacije frekvencije. Osnovni uvjet za sinkronizaciju generatora i uključivanje u paralelan rad na mreži je izjednačenje napona mreže motora  $u_m$  i generatora  $u_g$ , približno izjednačenje frekvencija  $f_m$  i  $f_g$ , te izjednačenje faza napona u trenutku priključenja potrošača sa mreže na generator. Izjednačenje i stabilizacija frekvencije, te izjednačavanje faza napona, postiže se promjenom brzine vrtnje pogonskog motora, neposrednim djelovanjem na regulator goriva dizelskog motora, koji je definiran potrebnom optimalnom snagom opterećenja, pa opterećenje generatora mora imati ručnu i automatsku regulaciju. Iz tog razloga snaga  $P_1$  mora biti limitirana i podesiva u nominalnom režimu rada, pa slijedi program regulacije brzine vrtnje automatskim regulatorom. Tijekom odvijanja programa regulacije brzine vrtnje motora, stalno se vrši ispitivanje uvjeta za zaustavljanje (kvar, greška, prekoračenje graničnih vrijednosti kritičnih parametara opterećenja, tlak ulja, temperatura rashladne vode itd.), te se ukoliko je neki od parametara ispunjen, automatski prelazi na programirano zaustavljanje.





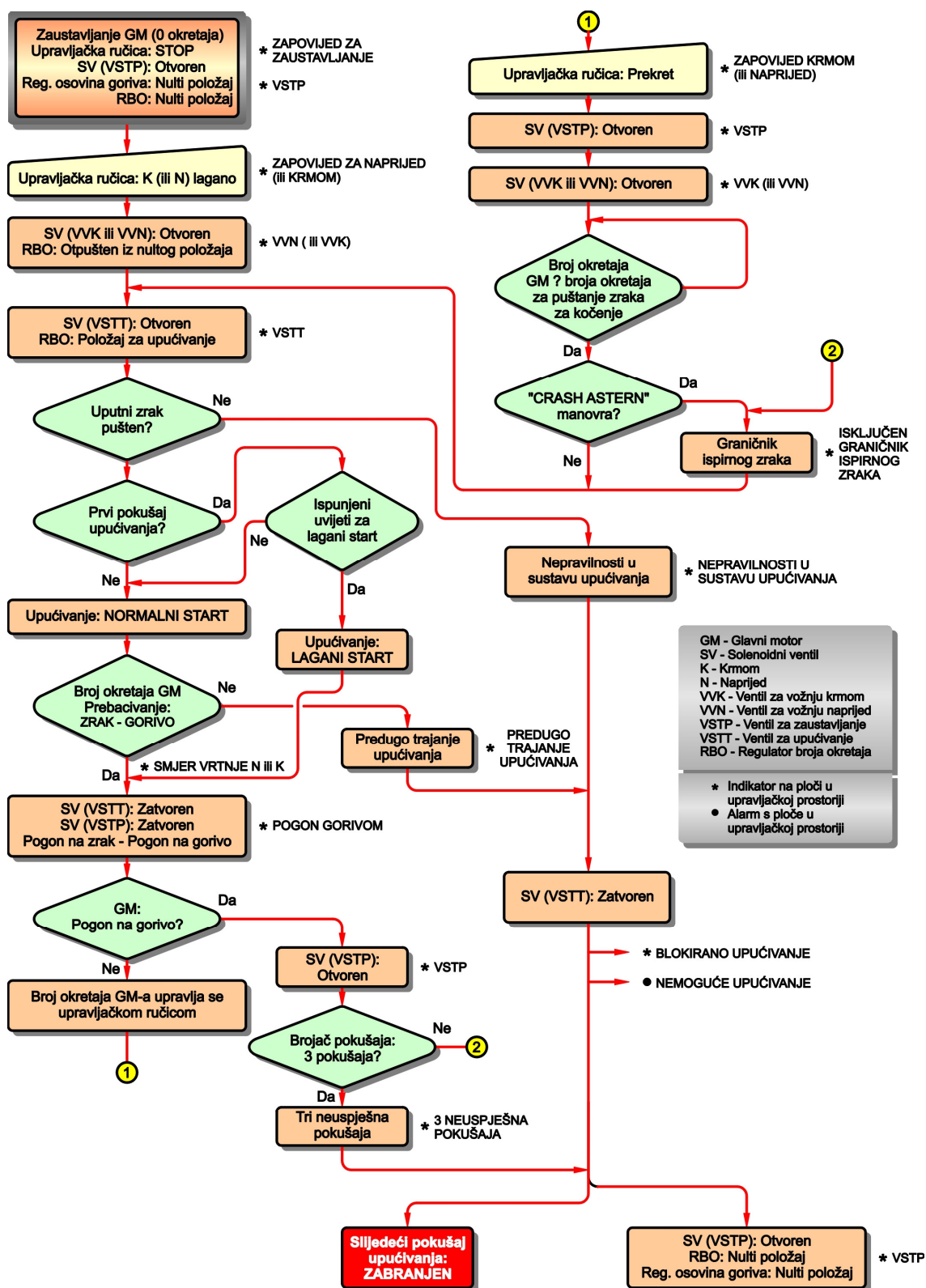
Slika 90. Dijagram toka predloženog modela

## 7.9. Uspostavljanje poriva

Da bi se ponovo uspostavila propulzija, mora se uputiti porivni motor. Za start porivnog motora osnovno je provjeriti parametre pomoćnih sustava, odnosno sustav ulja, rashladne vode, goriva i tlak zraka za upućivanje. Nakon što su zadovoljeni protoci, temperature i tlakovi navedenih sustava, može se započeti s upućivanjem. U algoritmu toka upućivanja, prekreta i zaustavljanja motora (Slika 91.) moraju biti predviđena dva načina upućivanja, tzv. laki start i normalni start, koji se automatski odabire ovisno o manevarskom stanju motora. Period upućivanja je završen kada se stabilizira rad porivnog motora na gorivo. Za normalni start uvjet je da osovinski generator bude odspojen. Brzina vrtnje motora kontrolirana je preko električnog ili mehaničkog regulatora brzine vrtnje, jedinicom za podešavanje brzine. Potrebno je dostići optimalnu brzinu za ukopčavanje osovinskog generatora i prijelaz na sustav dobivanja električne energije za potrebe broda preko glavnog motora i osovinskog generatora. Opterećenje motora je linearno i ovisi o uvjetima predgrijavanja rashladne vode i ulja za podmazivanje, a kreće se u granicama između 30% (podesivo) i 100% maksimalne snage. Priključenje osovinskog generatora ovisi o maksimalnom opterećenju motora, koje je uvjetovano vremenskom komponentom i može se regulirati u granicama 70-100%. Kod odabranog opterećenja definira se konstantna brzina vrtnje porivnog motora za rad osovinskog generatora.

U predloženom modelu alternativne propulzije, osovinski generator je spojen preko zupčanika (multiplikator) i uređaja koji osigurava konstantnu brzinu pogona generatora, kada brzina vrtnje porivnog stroja varira u navedenim granicama. Ukoliko je, npr. zbog manevra, promjena brzine vrtnje glavnog motora u području između 70 i 40%, trenutno djeluje linearna promjena snage generatora u području između 100 i 40% snage generatora (pogl. 6.2). Za predloženi model alternativne propulzije, osobito je značajno da se kod 40% brzine vrtnje porivnog motora, može koristiti snaga do 40%, što zadovoljava potrebe za električnom energijom neophodnih pomoćnih sustava porivnog stroja. Kod promjene brzine vrtnje glavnog motora u području između 70 i 40%, osobitu ulogu ima regulacija potrošnje električne energije, koja treba pravovremeno isključivati manje bitne potrošače, dajući prednost sustavima ulja, goriva, slatke i morske vode glavnog motora. U kritičnim slučajevima, ukoliko bi nestalo energije za nužnu rasvjetu i kormilarski sustav, potrebno je uputiti generator u nuždi.

Nakon uspješnog upućivanja porivnog stroja i uspostave propulzije broda, provjeravaju se nužni parametri za normalan rad motora i postepeno povećava opterećenje motora do optimalne snage. Nakon stabilizacije sustava i brzine vrtnje, prebacuje se pogon osovinskog generatora na glavni motor.

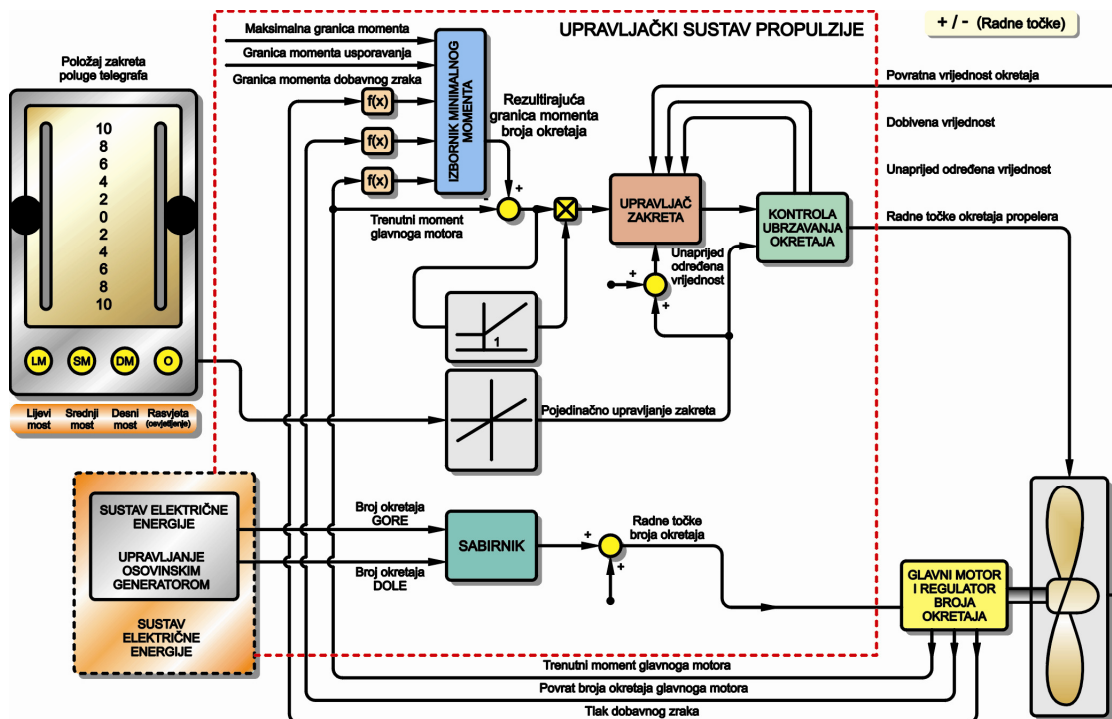


Slika 91. Algoritam toka upućivanja, prekreta i zaustavljanja porivnog motora

Da bi se prebacio osovinski generator, spaja se spojka (Slika 87.) motor multiplikator, te se pokreće jedinica konstantne frekvencije, neopterećena brzinom vrtnje osovinskog generatora, a potom se generator prebacuje na pogon multiplikatora pogonjenog porivnim strojem, što predstavlja najosjetljiviju fazu za rad porivnog stroja.

Sada se mogu analizirati dvije opcije opterećenja sustava, da se potrošači (ulje, gorivo, rashladna voda) izravno, bez zaustavljanja, prebace na novi sustav ili da se sustav goriva i rashladne vode isključi, pa postepeno priključi na mrežu, što ovisi o projektnim uvjetima, ali su obje opcije izvodljive.

Nakon uspješnog prebacivanja osovinskog generatora na pogon porivnog stroja, postepeno se (Slika 92.) priključuju potrošači, pazeći da se osovinski generator ne preopteretiti, budući da u pričuvi više nema dizelskog generatora.



Slika 92. Upravljački sustav regulacije brzine vrtnje porivnog stroja i osovinskog generatora

Upravljački sustav regulacije brzine vrtnje porivnog stroja i osovinskog generatora, za svaku radnu točku trenutnog opterećenja, kontinuirano usklađuje brzinu vrtnje porivnog motora, brodskog vijka i osovinskog generatora.

## 7.10. Simulacija predloženog modela alternativne propulzije

Kako su sve analize u radu provjeravane na tankeru *Zrinski* (referentni brod), predloženi model je zbog mogućnosti usporedbe, simuliran na istom tankeru.

Snaga porivnog broda, određuje se na temelju brzine broda, pri probnoj vožnji, koja je obično do 5% veća od eksploatacijske brzine broda. Prema dijagramima (Slike 4. i 5.), preliminarno je određena snaga poriva od 12.000 kW za brzinu broda od 14,5 čv i nosivosti 84.000 t, pri gustoći tereta od 0,75 t/m<sup>3</sup>, te promjeru brodskog vijka od  $D = 7,6$  m.

Na brodu je predviđen osovinski generator snage 1100 kW, koju je potrebno pridodati snazi porivnog motora, a kako u većini slučajeva brodovlasnik zahtijeva definiranje veličine "engine margin" (EM), koja označava rad porivnog stroja sa 80-90% opterećenja, što smanjuje potrošnju goriva, pri definiranju poriva treba voditi računa i o navedenoj vrijednosti.

Podloga za odabir snage i tipa porivnog stroja bit će dijagrami 6. i 7., a izbor porivnog stroja za navedeni model izvodi se prema "Man B&W Projekt Guide Twostroke Engines", na osnovi podataka iz prognostičkog dijagrama.

Za brzinu broda pri pokusnoj plovidbi od 14,5 čv, odabrana je iz izbornog dijagrama snage poriva, snaga od 9.292 kW (Ps), koja predstavlja tzv. "trajnu snagu u službi" i poklapa se s EM. Maksimalna trajna snaga u službi Pm (snaga s dodacima) iznosi  $P_m = 11.320$  kW.

Iz navedenog dijagrama, za brzinu broda u eksploataciji (smanjena brzina zbog obraslog trupa broda, nemirnog mora itd.) od 13,5 čv, slijedi  $P_s = 7.375$  kW i trajna snaga u službi s dodacima  $P_{sc} = 9.213$  kW.

Na osnovi definiranih podataka, određen je motor koji zadovoljava zahtjeve različitih režima rada "MAN B&W" tip 5L7OMC. Motor ima pet cilindara, daje trajno nominalnu snagu od 11.800 kW pri maksimalnoj brzini vrtnje od 100 min<sup>-1</sup>, uz moguće preopterećenje stroja od 110 % maksimalno 1 h svakih 12 sati rada.

Iz bilance električnog opterećenja i snage osovinskog generatora, slijedi da su za potrebe proizvodnje električne energije potrebna dva generatora u paralelnom radu, te jedan pričuvni istih karakteristika, osovinski generator i tzv. generator u nuždi manje snage za održavanje vitalnih funkcija broda.

Za definiranje predloženog modela alternativne propulzije, potrebno je definirati bilancu električne energije neophodne za rad pomoćnih službi glavnog motora (pogl. 7.8.).

Sustav rashladne morske vode (Slika 34.) ima mogućnost miješanja i recirkulacije usisne i izlazne morske vode, što omogućava ulaznu temperaturu u

rashladnik od 15 do 32 °C. Za normalan rad rashladnog sustava dovoljna je jedna pumpa morske vode kapaciteta 500 m<sup>3</sup>/h, snage 63 kW (Slika 36.)

U centralnom rashladniku morska voda preuzima toplinu kruga slatke vode niske i dijelom visoke temperature (Slika 38.). Rashladni sustav slatke vode niske temperature obuhvaća hlađenje ulja za podmazivanje glavnog motora, ulja za razvodnu osovinu, zraka turbopuhala itd. Predviđene su dvije pumpe slatke vode niske temperature, svaka kapaciteta 385 m<sup>3</sup>/h i snage 47,5 kW. Sustav visoke temperature obuhvaća hlađenje košuljica cilindra te ispušnih ventila motora, te dvije pumpe, svake kapaciteta 110 m<sup>3</sup>/h i snage 14 kW (Slika 39.)

Sustav ulja za podmazivanje glavnog motora, tlači se preko cirkulacijske pumpe kroz rashladnik i filter ulja do motora (Slika 42.). Podmazivanje sustava osovinskog generatora, vrši se preko sustava podmazivanja motora, uz kapacitet pumpe ulja od 288,6 m<sup>3</sup>/h i snage 56 kW. Za pumpu ulja razvodne osovine potreban je kapacitet od 6 m<sup>3</sup>/h i snaga od 1,4 kW (Slika 43.)

Sustav goriva (Slika 44.) dopušta korištenje teškog i dizelskog goriva. Iz dnevnog tanka, gorivo se tlači zupčastom dobavnom pumpom, tlaka 4 bar u visokotlačni sustav goriva, uz kapacitet pumpe od 3 m<sup>3</sup>/h i snagu od 0,6 kW (Slika 45.). Iz niskotlačnog sustava, cirkulacijska pumpa tlači gorivo tlaka 10 bar kroz predgrijač i filter do visokotlačne pumpe goriva glavnog motora. Cirkulacijska pumpa ima kapacitet 5,9 m<sup>3</sup>/h, koji je dvostruko veći od potrebnog, kako bi osigurao dobavu visokotlačnim pumpama uz snagu od 2,9 kW.

Sustav ventilacije za dobavu zraka u strojarnici je snage 50 kW.

Kako se motor upućuje s lakim gorivom, nije potrebna para, pa ni aktiviranje kotla loženog naftom.

Za određivanje potrebne snage novopredloženog tzv. “uzbudnog” motora, potrebno je zbrojiti snage opisanih pumpi, budući da se sve pokreću elektromotorom.

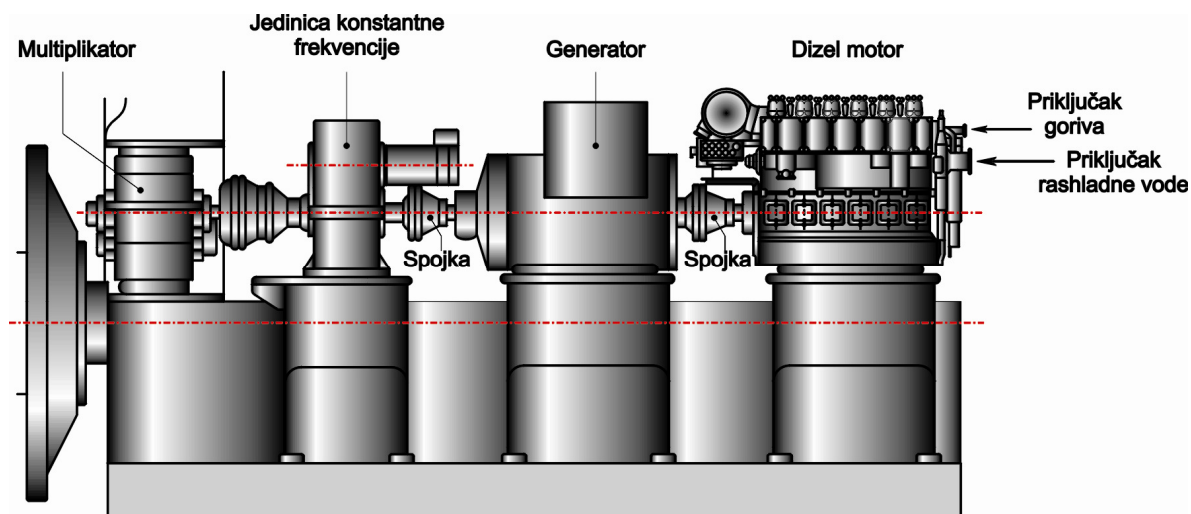
Na osnovi dobivene snage od 235,4 kW iz kataloga “Engine Selection Guide” proizvođača “MAN B&W”, odabire se motor D 2866 TE.

Snaga odabranog motora je 272,5 kW, brzina vrtnje 1.800 min<sup>-1</sup>, napon 440 V i frekvencija 60 Hz. Motor je četverotaktni s turbopuhalom. Gabariti motora u potpunosti zadovoljavaju mogućnost jednostavne ugradnje (Slika 87.) u brodski strojni kompleks.

Uslijed nestanka električne energije zaustavlja se poriv broda, ukoliko je nemoguće uputiti i staviti u pogon predviđene agregate za proizvodnju električne energije, predloženim se modelom može uspostaviti alternativno upućivanje i rad porivnog motora, a za navedeno rješenje potrebno je poduzeti sljedeće korake (Slika 93.).

Redoslijed aktiviranja modela alternativne propulzije:

1. Priključiti na tzv. uzbudni motor sustav vode i nafte.
2. Provjeriti da li je multiplikator odvojen od glavnog motora, odvojiti pomoću spojke 1 generator od multiplikatora.
3. Uključiti spojku uzbudni motor – generator.
4. Prekontrolirati ulje, vodu i gorivo uzbudnog motora.
5. Uputiti uzbudni motor pomoću akumulatora ili pneumatski.
6. Nakon postizanja nominalne brzine vrtnje motora i generatora, te zadane frekvencije, započeti s upućivanjem pumpi koje opslužuju pomoćne sustave glavnog motora.
7. Uspostavljanjem traženih parametara protoka, temperatura i tlaka pomoćnih sustava, pripremiti glavni motor za upućivanje.
8. Glavni motor se upućuje i postepeno se povećava brzina vrtnje i opterećenje motora do optimalnog (cca. 85 %).
9. Dostizanjem nominalne brzine vrtnje glavnog motora, započeti s pripremom prebacivanja osovinskog generatora na porivni stroj. Svi pomoćni sustavi vremenski ne utječu jednako na rad porivnog motora.



Slika 93. Sustav alternativne propulzije

Vremenski je najosjetljiviji sustav ulja, za koji je simulacijom utvrđeno (pogl. 4.4.), da prestankom rada pumpe ulja, nakon deset sekundi dolazi do prestanka rada motora. To znači da osovinski generator kod prebacivanja na pogon glavnog motora, mora u max. devet sekundi preuzeti neophodne potrošače, ili barem pumpu ulja. Normalnim radom osovinskog generatora može se zadovoljiti cjelokupna potrošnja električne energije na brodu tijekom navigacije. Ukoliko se iz nekih razloga ne bi mogao startati osovinski generator, uz pogon predloženim sustavom, moglo bi se doploviti do luke u kojoj bi bilo moguće izvršiti popravak brodskih agregata i izbjeći tegljenje broda. Time je potvrđena glavna teza koja je postavljena u istraživanju, a odnosila se na mogućnost postavljanja izvedivog modela sigurnije propulzije broda.



## 8. ZAKLJUČAK

Porivni proces brodskog dizelskog sustava po svojoj je opremi vrlo kompleksan i čini ga niz međusobno povezanih i ovisnih podsustava s velikim brojem različitih komponenti s izravnim utjecajem na poriv i samu eksploataciju broda. Pritom je od iznimne važnosti visok stupanj efikasnosti i raspoloživosti svih pogonskih procesa, koji su u funkciji elektroenergetskih sustava, osobito kod brodova čiji se poriv bazira na dvotaktnom sporookretnom dizelskom motoru. Kod velike većine navedenih poriva, nestankom električne energije, brod ostaje bez poriva. Ukoliko se ne uspostavi redundantni sustav proizvodnje električne energije, a generator u nuždi nije u stanju proizvesti toliko energije da se može ponovo uspostaviti poriv, do uklanjanja kvara na energetsom sustavu, brod ostaje prepušten vanjskim uvjetima ili se čak treba tegliti do luke gdje se može otkloniti kvar.

Iz navedenih tvrdnji postavljene su glavne teze koje su u istraživanju potvrđene i pronađen je adekvatan model kao odgovor na njih. Da bi se na znanstveno utemeljeni način dao odgovor na postavljene teze, bilo je potrebno u istraživanju izvršiti analizu propulzije na relevantnom uzorku brodova, čime se nedvosmisleno potvrdilo, da je na teretnim brodovima većinom zastupljen poriv sa sporookretnim prekretnim dizelskim motorom i fiksnim brodskim vijkom (pogl. 2.4.). Glavni podsustavi za normalnu eksploataciju navedenog poriva pogonjeni su kaveznim asinkronim elektromotorom, pa je sustav ovisan o znatnoj količini električne energije, koja se većinom proizvodi dizelskim generatorima, a tek u manjem dijelu tzv. pomoćnim agregatima kao što su turbo i osovinski generatori. Analiza baza podataka dokazuje da se najčešći kvarovi u brodskom strojnom kompleksu odnose na kvarove dizelskih generatora, što dokazuje ispravnost teze da se sigurnost brodskih sustava s gledišta poriva broda može povećati upravo istraživanjem i unapređenjima u području sustava proizvodnje električne energije na brodu (pogl. 5.4.).

Za manju zastupljenost turbogenerators moglo bi se pronaći opravdanje u činjenici da porivni motori manjih snaga nisu u stanju preko kotla utilizatora proizvesti dovoljnu količinu adekvatne pare za pogon turbogenerators, a ukoliko brod ne prevozi teret kojeg je potrebno zagrijavati parom, nema potrebe proizvoditi znatnu količinu pare, pa ima smisla ne ugrađivati turbogenerator (pogl. 6.3.). No, argument da se danas većinom za gorivo kod dizelskih generatora upotrebljava teško gorivo, te se time smanjila cijena proizvedenog kW električne energije na brodu, zasigurno ne može biti dovoljan argument za uključivanje trećeg dizelskog generatora u brodski strojni kompleks, odnosno ne ugrađivanje osovinskog generatora. Cijena proizvedenog kW energije sporookretnim dizelskim motorom naravno ostaje niža, što je dokazano simulacijom na strojarskom simulatoru, a novi osovinski generatori puno su pouzdaniji kod održavanja konstantne frekvencije (pogl. 6.2.). Stoga, uzimajući u

obzir cijene dizelskih i osovinskih generatora, proizvedenog kW električne energije, održavanje i napose fleksibilnost brodskog strojnog kompleksa, te izvršenog sveobuhvatnog istraživanja, autor je uvjeren da u model brodskog pomoćnog sustava za siguran poriv broda, svakako treba uključiti osovinski generator, čime se uvažavaju zahtjevi brodskih registara i osobito najnovija istraživanja koja upućuju na potrebu uključivanja trećeg generatora u brodski strojni kompleks (pogl. 5.4.;7.3.1.;7.6.).

Međutim, time još nije riješen problem upućivanja glavnog motora i uspostave propulzije kod kvara sustava proizvodnje električne energije. Zato je bilo nužno istražiti što predviđaju tzv. redundantni porivi (pogl. 2.6.) i osobito do kuda se stiglo u istraživanjima i razvoju tzv. "inteligentnih motora" u sustavu buduće "inteligentne strojarnice" (pogl. 3.). Istraživanje je potvrdilo teze da se razvojem inteligentnih motora nastoji prvenstveno udovoljiti sve strožim ekološkim zahtjevima, budući da se cjelokupni primat sporookretnih dizelskih motora zapravo zasniva na uporabi jeftinog i nekvalitetnog goriva, zašto se plaća velika ekološka cijena i pritom ostvariti što je moguće veća porivna autonomija o sustavu proizvodnje električne energije, prvenstveno ugradnjom privješenih pumpi. No to je uspješno riješeno u sustavu hidraulike novih motora (osim kod upućivanja), ali za sada i dalje ostaje ovisnost podsustava sporookretnih dizelskih motora o električnoj energiji.

Samo istraživanje sustava inteligentne strojarnice, ukazalo je na mogućnost postavljanja modela uspostave poriva korištenjem sustava hidraulike inteligentnog motora i uvođenja u sustav hidrogeneratora (pogl. 7.7.2.). Postavljen je realan i izvediv model, koji bi u budućnosti mogao biti još dodatno istražen i ostvariv, međutim, zbog složenosti energetske uređaja i vremenske ograničenosti akumulirane hidrauličke energije, nestabilnosti i niskog stupnja iskoristivosti hidraulike, autor smatra ponuđeni model s tzv. "uzbudnim motorom" boljim, izvodljivim i što je najvažnije najsigurnijim.

Da bi istraživanje bilo relevantno, analizirane su brojne mogućnosti uspostave poriva od naizgled jednostavne ideje povećanja snage generatora u nuždi, preko dodatnog kapaciteta akumulatorskih jedinica, do mogućnosti ugradnje privješenih pumpi na konvencionalne sporookretne porivne motore (pogl. 7.7.). Nakon opširne analize nametnuo se, kao najbolji, model pouzdanog pogona preko osovinskog generatora i "uzbudnog motora", kojim je moguće uspostaviti poriv nakon potpunog kvara sustava proizvodnje električne energije na brodu, proizvoditi dovoljnu količinu energije za opsluživanje poriva i plovību broda na vlastiti pogon do prve luke u kojoj se može otkloniti kvar energetske sustava.

Time je dokazana i potvrđena glavna teza ove doktorske disertacije, da je predloženim modelom, moguće uspostaviti poriv broda kod potpunog zakazivanja sustava proizvodnje električne energije na brodu i time bitno učiniti čitav sustav brodske propulzije sigurnijim.

Cijelo istraživanje potkrepljeno je simulacijom svih relevantnih čimbenika koji sudjeluju u porivnom procesu, na strojarskom simulatoru "Kongsberg Norcontrol PT 2000", čime su potvrđene teze koje u praksi utječu na poriv broda, kao što su kritične temperature, tlakovi i sustav zaštite porivnog motora (pogl. 4.2.;4.3.;6.1.1.;6.2.1.;6.3.1.), kao i simulacijom na tzv. referentnom brodu (pogl. 7.5.;7.10.), na kojem je simuliran i predloženi model, čije je rješenje novo i originalno, prikazano na znanstveni način i predstavlja po mišljenju autora, znanstveni doprinos u istraživanju i izučavanju brodskih strojnih sustava i brodstrojarstva u cjelini.

## POPIS SLIKA

|                                                                                              |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Slika 1. Sile poriva broda .....</i>                                                      | <i>13</i> |
| <i>Slika 2. Krivulja djelovanja brodskog vijka u slobodnoj vodi .....</i>                    | <i>15</i> |
| <i>Slika 3. Osnovne dinamičke značajke brodskog vijka .....</i>                              | <i>16</i> |
| <i>Slika 4. Dijagram izbora snage poriva.....</i>                                            | <i>18</i> |
| <i>Slika 5. Odnos snaga – promjer – brzina vrtnje.....</i>                                   | <i>19</i> |
| <i>Slika 6. Glavne dim. brodova za prijevoz general. tereta, rasutih tereta i tankera..</i>  | <i>21</i> |
| <i>Slika 7. Glavne dimenzije brodova za prijevoz kontejnera.....</i>                         | <i>22</i> |
| <i>Slika 8. Određivanje optimalne točke porivnog motora – "Layout" dijagram .....</i>        | <i>25</i> |
| <i>Slika 9. . Radne karakteristike motora i brodskog vijka za režime plovidbe .....</i>      | <i>26</i> |
| <i>Slika 10. Ovisnost zakret.momenta motora i brod. vijka o brzini za razne režime...</i>    | <i>27</i> |
| <i>Slika 11. Vanjske karakteristike dizelskih motora.....</i>                                | <i>30</i> |
| <i>Slika 12. Promjena opterećenja dizelskih motora za vrijeme ubrzanja broda .....</i>       | <i>31</i> |
| <i>Slika 13. Zastupljenost pogonskih strojeva u pomorstvu (po broju).....</i>                | <i>33</i> |
| <i>Slika 14. Zastupljenost pogonskih strojeva u pomorstvu (po instaliranoj snazi).....</i>   | <i>33</i> |
| <i>Slika 15. Porivni brodski sustav .....</i>                                                | <i>35</i> |
| <i>Slika 16. Struktura sustava brodske dizelske propulzije .....</i>                         | <i>35</i> |
| <i>Slika 17. Zalihost klase RP1 X%.....</i>                                                  | <i>38</i> |
| <i>Slika 18. Zalihost skupine RP2 X%.....</i>                                                | <i>39</i> |
| <i>Slika 19. Zalihost skupine RP3 X%.....</i>                                                | <i>40</i> |
| <i>Slika 20. Dva dizelska generatora I generator za nuždu .....</i>                          | <i>42</i> |
| <i>Slika 21. Tri dizelska generatora I generator za nuždu.....</i>                           | <i>42</i> |
| <i>Slika 22. Dva dizelska generatora i osovinski generator .....</i>                         | <i>43</i> |
| <i>Slika 23. Dva dizel. generat. i turbin. generat. s parnim kotlom na ispuš. plinove...</i> | <i>43</i> |
| <i>Slika 24. Koncept inteligentnog motora.....</i>                                           | <i>51</i> |
| <i>Slika 25. Sustav hidrauličnog ulja za upravljanje.....</i>                                | <i>54</i> |
| <i>Slika 26. Tok hidrauličkog ulja.....</i>                                                  | <i>54</i> |
| <i>Slika 27. Shema mehaničko hidrauličkog sustava.....</i>                                   | <i>55</i> |
| <i>Slika 28. Hidraulički sustav ubrizgavanja goriva I upravljanja ispušnim ventilom....</i>  | <i>57</i> |
| <i>Slika 29. Pumpa goriva.....</i>                                                           | <i>58</i> |

|                                                                                           |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Slika 30. Aktiviranje ispušnih ventila .....</i>                                       | <i>59</i>  |
| <i>Slika 31. Sustav ubrizgavanja goriva na RT-flex motoru .....</i>                       | <i>61</i>  |
| <i>Slika 32. Sustav servoulja na RT-flex motoru.....</i>                                  | <i>61</i>  |
| <i>Slika 33. "Common rail" sustav na RT-flex motoru .....</i>                             | <i>62</i>  |
| <i>Slika 34. Centralni rashladni sustav .....</i>                                         | <i>69</i>  |
| <i>Slika 35. Prosječna plovidba broda u određenim temperaturnim zonama mora ....</i>      | <i>70</i>  |
| <i>Slika 36. Određivanje pumpe morske vode.....</i>                                       | <i>71</i>  |
| <i>Slika 37. Rezultati simulacije prestanka rada pumpe morske vode .....</i>              | <i>72</i>  |
| <i>Slika 38. Rashladni sustav slatke vode .....</i>                                       | <i>74</i>  |
| <i>Slika 39. Određivanje pumpi slatke NT i VT vode .....</i>                              | <i>76</i>  |
| <i>Slika 40. Rezultat simulacije utjecaja sustava NT vode na porivni motor .....</i>      | <i>77</i>  |
| <i>Slika 41. Rezultat simulacije utjecaja sustava VT vode na porivni motor.....</i>       | <i>78</i>  |
| <i>Slika 42. Shema ulja za podmazivanje glavnoga porivnog dizelskog motora .....</i>      | <i>81</i>  |
| <i>Slika 43. Dijagram za definiranje pumpi ulja za podmazivanje porivnog motora.....</i>  | <i>82</i>  |
| <i>Slika 44. Sustav goriva .....</i>                                                      | <i>84</i>  |
| <i>Slika 45. Dijagram za definiranje pumpi goriva.....</i>                                | <i>85</i>  |
| <i>Slika 46. Sustav napojne vode kombiniranog kotlovskog postrojenja.....</i>             | <i>86</i>  |
| <i>Slika 47. Pouzdanost i nepouzdanost sustava, kao funkcija vjerojatnosti.....</i>       | <i>91</i>  |
| <i>Slika 48. Krivulja učestalosti kvarova .....</i>                                       | <i>94</i>  |
| <i>Slika 49. Odnos između srednje vrijednosti kvara i vrijednosti kvara.....</i>          | <i>97</i>  |
| <i>Slika 50. Model serijski povezanih elemenata.....</i>                                  | <i>98</i>  |
| <i>Slika 51. Aktivna i pasivna redundantnost.....</i>                                     | <i>99</i>  |
| <i>Slika 52. Sistematizacija kvarova na brodskim motorima.....</i>                        | <i>101</i> |
| <i>Slika 53. Koncentracija kvarova na velikim dvotaktnim motorima.....</i>                | <i>102</i> |
| <i>Slika 54. Multivarijabilni dijagram razdiobe kvarova .....</i>                         | <i>104</i> |
| <i>Slika 55. Kvarovi prijavljeni Swedish Club-u od 1988. - 1997. (prema uzroku) ....</i>  | <i>105</i> |
| <i>Slika 56. Kvarovi prijavljenih Swedish Club-u od 1988. do 1997. (prema mjestu).106</i> |            |
| <i>Slika 57. Najčešći kvarovi na porivnim motorima .....</i>                              | <i>106</i> |
| <i>Slika 58. Kvarovi kod srednjeokretnih i brzoekretnih motora .....</i>                  | <i>107</i> |
| <i>Slika 59. Uzroci kvarova u brodskom strojnom kompleksu.....</i>                        | <i>108</i> |
| <i>Slika 60. Kvarovi u brodskom strojnom kompleksu .....</i>                              | <i>109</i> |
| <i>Slika 61. Učestalost kvarova u ovisnosti od <math>\beta</math> .....</i>               | <i>110</i> |

|                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Slika 62. Funkcija gustoće kvara u ovisnosti o <math>\beta</math></i> .....               | 110 |
| <i>Slika 63. Osnovni proces dizelskog generatora</i> .....                                   | 115 |
| <i>Slika 64. Sustav za promjenu goriva</i> .....                                             | 116 |
| <i>Slika 65. Rashladni sustav dizelskog generatora</i> .....                                 | 117 |
| <i>Slika 66. Sustav komprimiranog zraka</i> .....                                            | 118 |
| <i>Slika 67. Podmazivanje pomoćnih motora</i> .....                                          | 119 |
| <i>Slika 68. Sustav upravljanja proizvodnjom el. energije</i> .....                          | 121 |
| <i>Slika 69. Simulacija preopterećenja dizelskog generatora</i> .....                        | 123 |
| <i>Slika 70. Mogućnost priključenja osovinskog generatora</i> .....                          | 126 |
| <i>Slika 71. Sustav osovinskog generatora</i> .....                                          | 127 |
| <i>Slika 72. Jedinica prijenosa konstantne frekvencije</i> .....                             | 128 |
| <i>Slika 73. Određivanje radnog područja porivn. motora i osovinskog generatora</i> .        | 129 |
| <i>Slika 74. Područje rada osovinskog generatora</i> .....                                   | 130 |
| <i>Slika 75. Simulacija osovin. generat. u nepovoljnim vremen. uvjetima plovidbe</i> ...     | 131 |
| <i>Slika 76. Iskorišt. otpadne topline ispuš. plinova GM za proizvodnju el. energije</i> ..  | 133 |
| <i>Slika 77. Simulacija kvara sustava turbogeneratora</i> .....                              | 134 |
| <i>Slika 78. Model sustava s tri dizelska generatora</i> .....                               | 142 |
| <i>Slika 79. Model sigurnosti pogona s osovinskim generatorom na mreži</i> .....             | 145 |
| <i>Slika 80. Model sigurnosti pogona s turbogeneratorom</i> .....                            | 147 |
| <i>Slika 81. Kombinacija ugradnji više generatora iste snage</i> .....                       | 157 |
| <i>Slika 82. Kombinajski dijagram paralelnog sustava drugog reda</i> .....                   | 158 |
| <i>Slika 83. Model ugradnje hidrogeneratora u sustav porivnog stroja</i> .....               | 166 |
| <i>Slika 84. PTO/PTI sustav redundantne propulzije</i> .....                                 | 169 |
| <i>Slika 85. Automatika pomoćnih dizelskih agregata</i> .....                                | 170 |
| <i>Slika 86. Model predlaganog pouzdanog pogona</i> .....                                    | 175 |
| <i>Slika 87. Ugradnja osovinskog generatora s predloženim motorom</i> .....                  | 176 |
| <i>Slika 88. Dijagram toka startanja i rada dizelskog generatora</i> .....                   | 178 |
| <i>Slika 89. Dijagram toka prestanka rada D - G i nestanka struje "Back-out"</i> .....       | 179 |
| <i>Slika 90. Dijagram toka predloženog modela</i> .....                                      | 181 |
| <i>Slika 91. Algoritam toka upućivanja, prekreta i zaustavljanja porivnog motora</i> .....   | 183 |
| <i>Slika 92. Uprav. sustav regulac. brzine vrtnje poriv. stroja i osovin. generatora</i> ... | 184 |
| <i>Slika 93. Sustav alternativne propulzije</i> .....                                        | 187 |

## POPIS TABELA

|                                                                                               |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Tabela 1. Granične točke porivnog dijagrama .....</i>                                      | <i>24</i>  |
| <i>Tabela 2. Broj instaliranih porivnih dizelskih motora u periodu 1974. do 1998.....</i>     | <i>34</i>  |
| <i>Tabela 3. Instalirana snaga (mil.KS) poriv. dizel. motora u periodu 1974. do 1998.....</i> | <i>34</i>  |
| <i>Tabela 4. Redundantni paralelni sustavi generatora.....</i>                                | <i>103</i> |
| <i>Tabela 5. Statistički parametri kvarova redundantnih sustava generatora.....</i>           | <i>104</i> |
| <i>Tabela 6. Osovinski generat. ugrađeni na porivne strojeve sa fiks. brod. vijkom .....</i>  | <i>125</i> |
| <i>Tabela 7. Osnovni podaci referentnog broda.....</i>                                        | <i>152</i> |
| <i>Tabela 8. Prosječna vrijednost broda navedene klase .....</i>                              | <i>153</i> |
| <i>Tabela 9. Prosječne vozarine referentnog broda.....</i>                                    | <i>153</i> |
| <i>Tabela 10. Vrijednost tereta koji prevozi tanker Zrinski .....</i>                         | <i>154</i> |
| <i>Tabela 11. Poslovni gubici zbog kvara .....</i>                                            | <i>155</i> |
| <i>Tabela 12. Vremenski gubici zbog tegljenja tankera.....</i>                                | <i>155</i> |
| <i>Tabela 13. Poslovni gubitak zbog tegljenja tankera.....</i>                                | <i>156</i> |
| <i>Tabela 14. Rezultat modeliranja stupnja zalihosti za <math>R_0 = 0,6</math>.....</i>       | <i>159</i> |
| <i>Tabela 15. Rezultat modeliranja stupnja zalihosti za <math>R_0 = 0,5</math>.....</i>       | <i>160</i> |

## LITERATURA

1. Aeberli, K., M. Geist, The Recent developments in the Sulzer RTA low speed engine program, Copenhagen, CIMAC Congres, 1998.
2. Akaike, H., G. Kitagawa, The Practice of time series analysis, statistics for engineering and physical science, New York, Springer-Verlag, 1999.
3. Antičić, R., Automatizacija broda II, Split, Pomorski fakultet, 2005.
4. Antonoć, R., Mikroelektronički sistem za automatizirano upravljanje i nadzor brodskog dizel-generatorskog kompleksa, magistarski rad, Zagreb, R. Antičić, 1986.
5. Antičić, R., Na kvarove tolerantan sustav upravljanja sporohodnim dizelskim motorom za brodsku propulziju, doktorska disertacija, Zagreb, R. Antičić, 2002.
6. Automatic control systems, control of electrical power, control systems applications, Boca Raton, 2000.
7. Basic principles of ship propulsion, Copenhagen, MAN B&W Diesel A/S, 1998.
8. Becker, H. M., Additional redundant propulsion systems on chemical tanker new-buildings, London, Marine Propulsion Conference, 2001.
9. Belak, S., The Advanced Aframax tanker engine room design analysis, ISME6, Tokyo, The Marine Engineering Society in Japan, 2000.
10. Blaeir, G. P., Design and simulation of two-stroke engines, Warrendale, Society of Automotive Engineers, 1996.
11. Blanke, M., Reconfigurable control of a ship propulsion plant, Proc. of the Int. Conf. of Control Appl. In Marine systems, Oct. 1998.
12. Brownlie, K., Controllable pitch propellers, London, The Institute of Marine Engineers, 1988.
13. Buxton, J. L., C. P. W. Hornsby, Shipboard software-based systems and their classification, Trans Imare, 103(1991), 341-347.
14. Cartledge, K., J. Mabey, D Stead, Future platform management systems (PMS) Risk mitigation, INEC 2002., Glasgow, The Marine Engineer in the Electronic Age, 2002.
15. Cowley, J., The Running and maintenance of marine machinery, London, The Institute of Marine Engineers, 1994.



16. Dave, J., J. P. Mackey, Condition monitoring proposals of the application of system fault prognosis and diagnostik for future naval platforms, INEC 2002, Glasgow, The Marine Engineer in the Electronic age, 2002.
17. De Vale, J., Traditional reliability, Carnegie Mellon University, 1999.
18. Eeberg, C. E., The MAN B&W two-stroke diesel engine end it's prospekts, Copenhagen, CIMAC Congress, 1998.
19. Eriksson, L., Requirements for, and a systematic methods for redentifying heat release model parameters, Detroit, SAE Transactions, Modelin of SI and Disel Engineers, 1998.
20. Fiskaa, G. O., Process modelling of two-stroke diesel engines, Int Symposium on Advances in Marine Tehnology, 1990.
21. General technical data for marine diesel engines, Wintertur, Sulzer, 2005.
22. Grimmeliuss, H. T., The use of first principle modelling for faulty behaviour prediction in desing stage, INEC 2002., Glasgow, The Marine Engineer in the Electronic age, 2002.
23. Tehnički priručnik, Zagreb, Končar, 1991.
24. Hashimoto, T., /et al./, Some considerations on dependability of redundant power systems on bord due to the marine field data in Japan, ISME6, Tokyo, The Marine Engineering Society in Japan, 2000.
25. Hayer, K., Operational design and through life costs, Seaways, March 1999.
26. Hernqvist, M., Main engine damage from an insurers point of view, Copenhagen, CIMAC Congress, 1998.
27. Holland, S. A., M. Benatmane, M., T. J. McCoy, Industrial generators come aboard, Marine engineering challenges for 21<sup>st</sup> century, INEC 2000, Hamburg, 2000.
28. Hooke, N., Maritime casualties, London, Lloyds Maritime Information Services 1963 – 1996, 1997.
29. Installation aspects of MAN B&W main end auxiliary engines, Copenhagen, MAN B&W Diesel A/S, 1998.
30. Jadrić, M., B. Frančić, Dinamika električnih strojeva, Zagreb, Graphis, 1997.
31. Jurjević, M., Sustavno dinamičko modeliranje diesel motora sa turbopuhalom, magistarski rad, Split, M. Jurjević, 2001.
32. Kuljača, Lj., Z. Vukić, Automatsko upravljanje sistemima, Zagreb, Školska knjiga, 1985.
33. Lockner, A., Hancock, P. D., Redundancy in fault tolerant systems, CIME Mechanical Engineering, May, 1990., 76 – 83.

34. Martinović, D., Analiza i izbor rashladnog sustava broda, magistarski rad, Rijeka, D. Martinović, 1997.
35. Martinović, D., D. Martinović, Strojarski priručnik za časnike palube, Rijeka, Žagar, 2005.
36. Martinović, D., Brodski strojni sustavi, Rijeka, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, 2005.
37. MAN B&W, Diesel computerized engine application system (CEAS), Copenhagen, MAN B&W Diesel A/S, 1999.
38. MAN B&W, Trends in the volume and nature of propulsion machinery Denmark-the low speed sector, Copenhagen, 2000.
39. MAN B&W, The Intelligent engine, development status and prospects, Diesel A/S, Copenhagen, 2001.
40. McGeorge, H. D., Marine auxiliary machinery, Oxford, Butterworth-Heinemann, 1999.
41. Messer, A. C., System integration and complexity : managing dependability, INEC 2002, Glasgow, The Marine Engineer in the Electronic age, 2002.
42. Milić, L., Dinamički kontinuirani simulacijski model brodskog dizelmotornog porivnog sustava, doktorska disertacija, Rijeka, L. Milić, 1996.
43. Milwee, W., Modern marine salvage, New Jersey, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1996.
44. Moller, E., Redundancy of propulsion plants, London, Marine Propulsion Conference, 2001.
45. Munetić, A., I. Kuzmanić, M. Krčum, System dynamics simulation modelling of the marine synchronous generator set, Modelling and Simulation, Pittsburgh, 1998.
46. Newell, J., P. J. Rottier, Identification, modeling and control of power systems with application to in service and future naval vessels, Conference Proceedings, Electric Warship, Power control System Protection, London, The Institute of Marine Engineers, 1999.
47. Nuti, M., Emissions from two-stroke engines, SAE, Warrendale, 1999.
48. Parhami, B., Defect, failure, IEEE Transactions on Reliability, 46(1997), 4.
49. Paro, D., Engine technology for future fuels and emission demands, ICMES, New York, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2000.
50. Pažanin, A., Brodski motori, Zagreb, Školska knjiga, 1983.

51. Petrović, R., M. Vujošević, D. Petrović, Optimizacija redundantnih sistema, Beograd, Saobraćajni fakultet, 1993.
52. Projekt Guide-Two-Stroke Engines MAN B&W, 1998.
53. Rensvik, E., IT applications in ship operation and management, ICEMS, New York, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2000.
54. Račić, N., Simulacija dinamičkih uvjeta rada brodskoga propulzijskoga dizelskog motora, magistarski rad, Rijeka, N. Račić, 1998.
55. Sarapa, N., Teorija vjerovatnosti, Zagreb, Školska knjiga, 1987.
56. Skalicki, B., J. Grilec, Brodski električni uređaji, Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2000.
57. Schurbein, E., Elits, P., Is there an alternative today to large-bore diesel engines, Copenhagen, CIMAC Congress, 1998.
58. Securius, P., How to conform to redundancy rules, London, Marine Propulsion Conference, 2001.
59. Shaft generators power take off from the main engine, Copenhagen, MAN B&W Diesel A/S, 2000.
60. Shiihara, H., N. Sumi, A study on human factors in engine room, ISME 6, Tokyo, The Marine Engineering Societi in Japan, 2000.
61. Shuttle tanker propulsion, Copengagen, MAN B&W Diesel A/S, 1998.
62. Sorensen, P., Computer controlled systems for two-stroke mashinery, Amsterdam, Marine Propulsion Conference 2000, 2000.
63. Stojić, M., Kontinuirani sistemi automatskog upravljanja, Beograd, Građevinska knjiga, 1985.
64. Šimić, D., Osnovi automatskog upravljanja, Beograd, Naučna knjiga, 1990.
65. Šretner, J., Brodski motori s unutrašnjim izgaranjem, Zagreb, Sveučilišna naklada Liber, 1972.
66. Taylor, D. A., Introduction to marine engineering, 2nd ed., Oxford, Batterworth-Heinemann, 1999.
67. Terwisga, T, J. Holtrop, G. Kuiper, Propulsor developments - past, present and future, Propulsion 2000, London, The Institute Engineers, 1999.
68. Tireli, E., D. Martinović, Brodske toplinske turbine, Rijeka, 2001.
69. Tireli, E., J. Dvornik, Z. Kulenović, Simulation and heuristics optimization of turbine drive generating set, 9<sup>th</sup> International Research/Expert conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology", TMT 2005, Antalya, Turkey, 2005.

70. Tomas, V., Model distribuiranog dijagnostičkog sistema brodskih elektroenergetskih postrojenja, doktorska disertacija, Rijeka, V. Tomas, 2003.
71. Uni-concept auxiliary systems for two-stroke main engines and four-stroke auxiliary engines, Copenhagen, MAN B&W Diesel A/S , 1997.
72. Villemeur, A., Reliability, availability, maintainability and safety asseesments, New York, John Wiley & Sons, 1992.
73. Vlahinić, I., V. Tomas, Pristup osnivanju sistema vođenja električne *centrale* s integriranim dizel generatorima, Zbornik radova Pomorskog fakulteta, 9(1995), str. 87-95.
74. Vorobyov, Y. L., Y. E. Drobyshevsky, Mathematical simulation of ship manoeuvres in unbounded and restricted seas, Boston, Marine Offshore and Ice Tehnology, Computational Mechanics Publications, 1994.
75. Vukić, Z., Lj. Kuljača, Automatsko upravljanje, analiza linearnih sustava, Zagreb, Kigen, 2005.
76. Watson, G. O., Marine electrical practicice, London, Butterworth-Heinemann, 1990.
77. Warsila – Sulzer, Cooling water system, Vaasa, 2002.
78. Weisser, G., F. X. Tanner, K. Boulouchos, Modeling of ignition and early flame development with respekt to large engine simulation, Detroit, SAE Transactions, 1998.
79. Wilson, K., J. Dragsted, N. Hansen, When knowledge is safety, end money, ISME 6, Tokyo, The Marine Engineering Society in Japan, 2000.
80. Zamanabadi, I. R., Fault tolerant supervisory control-system analysis and logic desing, PhD, Department of Control Eng., Alborg Univ, Denemark, 1999.
81. L90MC – C projekt guide, Copenhagen, MAN B&W A/C, 1999.
82. Specification data for components, Model PPT2000, MC90-III, Konsberg Norcontrol AS, 1998.