

# Sustav za regulaciju brzine vrtnje brodskog porivnog motora

---

**Muselin, Mislav**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:258207>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-06-28**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**MISLAV MUSELIN**

**SUSTAV ZA REGULACIJU BRZINE  
VRTNJE BRODSKOG PORIVNOG  
MOTORA**

**ZAVRŠNI RAD**

**SPLIT, 2022.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**STUDIJ: BRODOSTROJARSTVO**

**SUSTAV ZA REGULACIJU BRZINE**  
**VRTNJE PORIVNOG BRODSKOG**  
**MOTORA**

**ZAVRŠNI RAD**

**MENTOR:**  
**Prof. dr. sc. Nikola Račić**

**STUDENT:**  
**Mislav Muselin**  
**(MB:0177048176)**

**SPLIT, 2022.**

## SAŽETAK

U ovom radu je opisan sustav za regulaciju brzine vrtnje porivnog broskog motora. Prikazan je osnovni princip automatske regulacije, te objašnjeni svi njeni parametri, kao i regulatori koji se koriste. Teoretski su opisani sustavi za regulaciju brzine vrtnje porivnog motora s vijkom s fiksnim krilima kao i sheme i objašnjenja raznih oblika regulatora. Objašnjen je i sustav promjenjivog vremena ubrizgavanja goriva koji uvelike pomaže u regulaciji brzine vrtnje glavnog motora, kao i visokotlačni akumulacijski sustav ubrizgavanja goriva. Naveden je i primjer regulacije brzine vrtnje motora Wartsila 18V32 sa skicama regulatora i cijelog sustava za regulaciju brzine vrtnje tog motora.

**Ključne riječi:** *regulacija, porivni motor, regulator, Wartsila, brzina vrtnje*

## ABSTRACT

This paper describes a propulsion marine engine revolution regulation system. The paper also describes basic principle of the automatic control and explains all its parameters, as well as the types of regulators. Propulsion marine engine with fixed propeller is described in theory with schemes and explanations of various forms of governors. The variable injection timing system, which greatly helps in regulation of main engine revolution, as well as the common rail fuel injection system are also explained. An engine revolution regulation system of Wartsila 18V32 is also given with schemes of the governor and the system in its whole.

**Keywords:** *regulation, propulsion engine, governor, Wartsila, revolution*

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OSNOVE AUTOMATSKE REGULACIJE</b> .....	<b>2</b>
2.1. REGULACIJSKI KRUG .....	2
2.2. VRSTE REGULATORA BRODSKIH PORIVNIH MOTORA .....	4
<b>3. SUSTAVI REGULACIJE BRODSKIH MOTORA</b> .....	<b>8</b>
3.1. PRAVILA REGISTRA .....	10
3.1.1. Regulatori brzine i zaštitni uređaji prekoračenja brzine za motore s unutarnjim izgaranjem.....	10
3.1.2. Pravila Hrvatskog registra brodova za proračun debljine krila broskog vijka	12
3.2. SUSTAV REGULACIJE PORIVNOG MOTORA S VIJKOM S FIKSNIM KRILIMA.....	13
3.2.1. Izvedbe brodskih regulatora .....	13
3.2.2. Mehanički regulatori brzine .....	14
3.2.3. Hidromehanički regulatori brzine .....	15
3.2.4. Električni (digitalni) regulatori .....	18
3.3. SUSTAV PROMIJENJIVOG VREMENA UBRIZGAVANJA.....	20
3.3.1. Slobodnost mehaničkih dijelova .....	22
3.3.2. Provjera vrijednosti indikatora opterećenja .....	22
3.3.3. Postavka VIT aktuatora .....	22
3.3.4. Zazor VIT-a.....	22
3.3.5. Električni priključak .....	23
3.3.6. Pneumatski cilindar .....	23
3.3.7. Period uhodavanja motora .....	24
3.3.8. Motor radi s isključenom jedinicom .....	24
3.3.9. Kvar VIT-a .....	24
3.4. COMMON RAIL SUSTAV UBRIZGAVANJA .....	25
<b>4. PRIMJER REGULACIJE MOTORA WÄRTSILÄ 18V32</b> .....	<b>28</b>
4.1. COMMON RAIL SUSTAV TVRTKE WÄRTSILÄ .....	31
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>34</b>

<b>LITERATURA .....</b>	<b>35</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>37</b>
<b>POPIS KRATICA .....</b>	<b>38</b>

# 1. UVOD

Pomorska je djelatnost koja se usavršava svaki dan po po uvjetima koje joj svijet pruža. Gorivo je sve skuplje, pogotovo u ovim kriznim vremenima, a sve stroži sigurnosni zahtjevi tjeraju brodare da već sada naprednu tehnologiju guraju prema novim rješenjima za što efikasnije funkcioniranje svih brodskih sustava, naročito pogonskog sustava u svrhu što ekonomičnije potrošnje goriva.

Ovaj završni rad objašnjava sustav za regulaciju brzine vrtnje pogonskog motora koji služi upravo za gore spomenuta rješenja.

U drugom poglavlju pojašnjena je osnova automatske regulacije, kao i sami regulacijski krug sa svim svojim članovima i veličinama, bile one ulazne ili izlazne. Dalje su opisane vrste regulatora koji se koriste kao brodski regulatori sa svojim karakteristikama i samom upotrebom istih.

Treće poglavlje govori o izvedbama porivnog motora i detaljnije opisuje sustav regulacije brzine vrtnje motora s vijskom s fiksnim krilima, te su u potpoglavlju navedeni i objašnjeni tipovi regulatora koji se koriste kod takve izvedbe motora. Također, regulatori, kao i sve ostale komponente brodskih sustava moraju biti po zakonskim regulativama koje izdaju nadležna klasifikacijska društva, što je isto pojašnjeno. Nadalje, objašnjen je još jedan način regulacije brzine vrtnje, sustav promjenjivog vremena ubrizgavanja skupa s njegovim postavkama. Common rail sustav ubrizgavanja je korak naprijed u odnosu na VIT sustav, pa je i on opisan u zadnjem potpoglavlju trećeg poglavlja.

Primjer regulacije pravog motora nam je prikazan u četvrtom poglavlju rada. Za primjer je uzet motor Wartsila 18V32. Prikazane su sheme i objašnjenja regulatora, cijelog sustava za regulaciju brzine, kao i uređaja za prekoračenje brzine vrtnje porivnog motora. Također, za gore spomenuti Common rail sustav, opisan je i primjer pravog sustava, a radi se opet o sustavu tvrtke Wärtsilä.

Završni rad završava zaključkom u zadnjem poglavlju rada u kojem su komentirani i objašnjeni zaključci doneseni na temelju obrazloženih teorijskih i stvarnih primjera danih u glavnoj razradi rada.

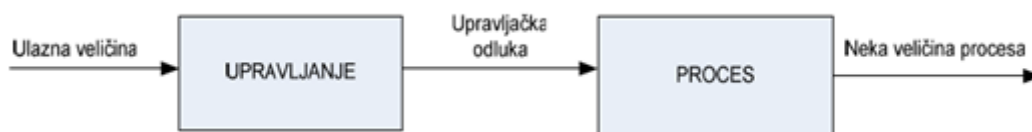
## 2. OSNOVE AUTOMATSKE REGULACIJE

Automatska regulacija je jedan od najvažnijih zadataka koji se postavljaju u današnjoj eri razvitka. Njen je zadatak da pomoću odgovarajućih uređaja održava zadano stanje nekog procesa usprkos svim poremećajima [15].

Da bi mogli objasniti pojam automatske regulacije, potrebno je prvo pojasniti pojmove regulacija, upravljanje i vođenje procesa.

Regulacija može biti ručna ili automatska. Izlazna veličina u regulacijskom sustavu djeluje povratno na ulaznu veličinu, dok održava postavljeno stanje izlazne veličine. Regulacija je zatvoreni krug, za razliku od upravljanja.

Upravljanje je postupak pri kojem jedna ili više ulaznih veličina utječe na jednu ili više izlaznih veličina nekakvog procesa prema pravilima svojstvenim upravljanoj procesu. Upravljanje se događa u otvorenom krugu. To znači da kod upravljanja nema povratne veze koja će moći odraditi usporedbu željene i stvarne vrijednosti, odnosno, ne postoji mogućnost popravljivanja upravljačke odluke na temelju promatranja odvijanja procesa.



**Slika 1. Shema upravljanja (otvoreni krug) [10]**

Vođenje procesa je kombinacija regulacije i upravljanja kod složenih sustava uz korištenje elektroničkih računala. Sustavi signalizacije, registracije i zaštite spadaju pod vođenje sustava [10].

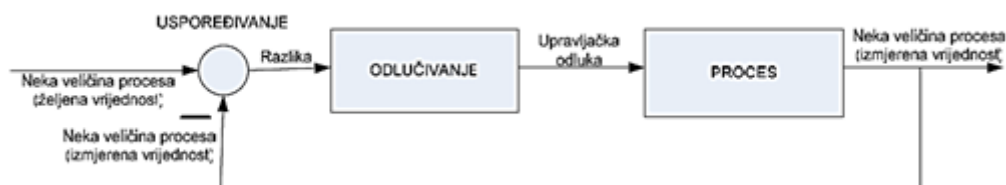
Automatizacija je nastavak procesa mehanizacije zato što se automatizirati može samo onaj proces koji je dovoljno mehaniziran. Automatizacija u širem smislu obuhvaća sve procese i mjere kojima se smanjuje udio ljudskog rada, odlučivanja i opažanja.

### 2.1. REGULACIJSKI KRUG

Glavni smisao povratne veze je usporedba aktualne vrijednosti sa željenom vrijednošću i djelovanje na temelju njihove razlike. Povratna veza je jednostavni princip kojim su obuhvaćeni svi principi regulacije u prirodi.



Automatska regulacija po definiciji je automatsko održavanje željenog stanja nekog procesa ili mijenjanje tog stanja po određenom zakonu, bez obzira na djelovanje vanjskih i unutarnjih poremećaja. To se postiže pomoću gore spomenute povratne veze. Ta povratna veza odlučuje kako usmjeriti proces. Sam proces se usmjerava upravljanjem toka energije ili tvari.



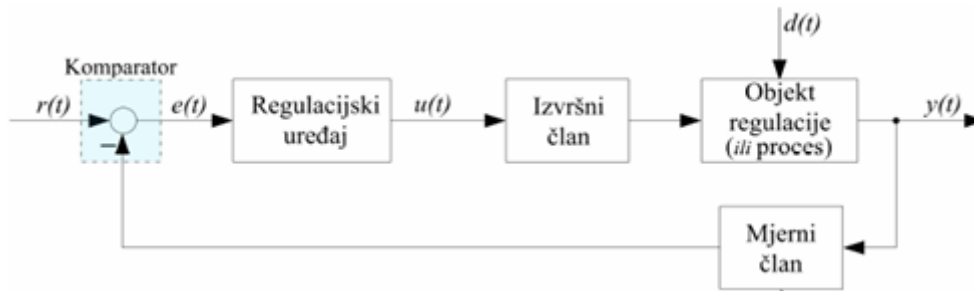
**Slika 2. Regulacijska petlja [10]**

Regulacijski krug se sastoji od regulacijskog člana, izvršnog člana, procesa, te mjernog člana zajedno sa svim ulaznim veličinama i odstupanjima.

Regulirana veličina  $y(t)$  na izlazu iz procesa dolazi prvo do mjernog člana, koji se sastoji od mjernog davača i pretvarača. Mjerni davač ima zadatak mjeriti reguliranu veličinu i prenijeti je za daljnju obradu. Funkcija pretvarača je da dobiveni signal pretvori tako da je taj signal prilagođen za daljnju obradu po signalnom području, po fizikalnom mediju i po karakteru signala.

Regulacijski član se sastoji od komparatora, vremenskog člana i regulacijskog pojačivača. Regulirana veličina iz mjernog člana ulazi prvo u komparator, gdje se uspoređuje s referentnom veličinom  $r(t)$  koja dolazi iz davača referentne veličine. Razlika ova dva signala se naziva regulacijsko odstupanje ili regulacijska pogreška  $e(t)$ , te ono djeluje na vremenski član gdje se signal preoblikuje u skladu sa zahtjevima regulacijskog kruga. Tako oblikovani signal treba u pravilu pojačati jer je on i u početku bio male energije, a prolazom kroz pasivne sklopove i dalje se oslabljuje.

Regulacijski signal se dalje vodi u izvršni član koji se sastoji od postavnog pogona i postavnog člana. Kao postavni pogon obično služi neki motor i on upravlja postavnim članom, obično ventilom [15]. Signal kao postavna veličina  $u(t)$  ulazi u proces i djeluje suprotno poremećajnoj veličini  $d(t)$ . Postavni član se često izvodi kao dio objekta regulacije (procesa).

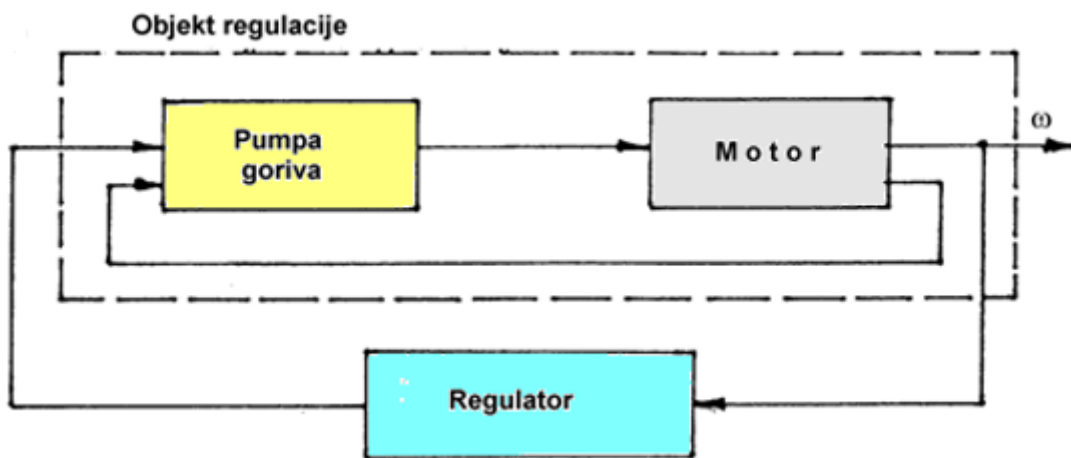


Slika 3. Opći blok dijagram automatske regulacije [13]

## 2.2. VRSTE REGULATORA BRODSKIH PORIVNIH MOTORA

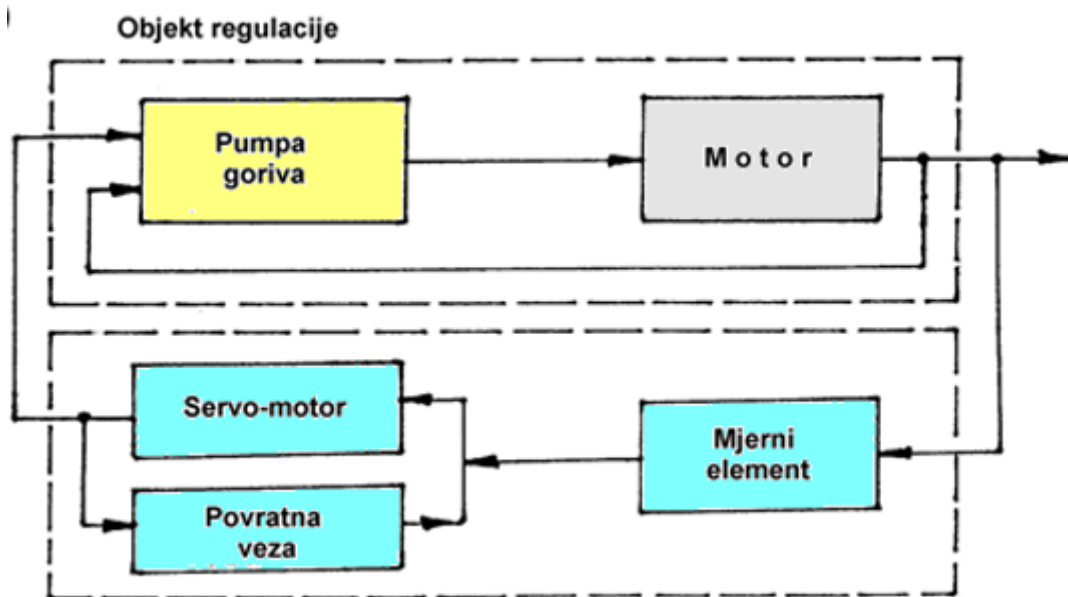
Za regulaciju brzine vrtnje brodskih dizelskih motora rabe se najčešće mehanički (centrifugalni) regulatori [6]. Detaljnije o takvoj, a i drugim izvedbama, će biti riječi u sljedećem poglavlju. Brodski regulatori mogu biti izravnog ili neizravnog djelovanja.

Kod regulatora s izravnim djelovanjem izmjerena veličina preko regulatora djeluje izravno na polužje visokotlačne pumpe goriva. Ovakvi regulatori se primjenjuju na malim brodicama, primjerice na čamcu za spašavanje [6].



Slika 4. Strukturna shema sustava automatske regulacije izravnog djelovanja [6]

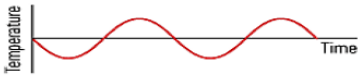
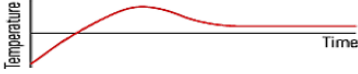
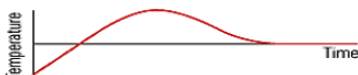
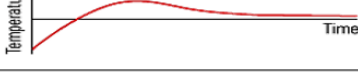

Regulator s neizravnim djelovanjem u svojoj regulacijskoj petlji ima mjerni element (najčešće to budu utezi toga regulatora) i servo motor, kao pojačivač sile koja djeluje na visokotlačnu pumpu goriva. Ovakav sustav regulacije upotrebljavamo za porivne i pomoćne motore.



**Slika 5. Strukturalna shema sustava automatske regulacije neizravnog djelovanja [6]**

Nadalje, regulatori se mogu podijeliti i prema zakonu regulacije. Zakonom regulacije se naziva matematička ovisnost djelovanja regulatora na objekt funkcije [16]. S obzirom na tu podjelu regulatori mogu biti:

- proporcionalni regulatori (P-regulatori), kod kojih se letva visokotlačne pumpe goriva pomiče proporcionalno promjeni broja okretanja vratila motora (imaju statičku grešku)
- integralni regulatori (I-regulatori), kojima je regulacijsko djelovanje jednako integralu odstupanja broja okretaja od zadane vrijednosti. Takvi regulatori nemaju statičku grešku ni zaostale neravnomjernosti
- proporcionalno-integralni regulatori (PI-regulatori) koriste najbolje karakteristike P-regulatora i I-regulatora. Promjena broja okretaja vratila utječe na veličinu i brzinu pomaka letve za promjenu dobave goriva
- proporcionalno-integralno-derivacijski regulatori (PID-regulatori) su regulatori kojima pomicanje letve za dobavu goriva ovisi o broju okretaja i brzine njegove promjene. Promjena broja okretaja također utječe i na brzinu pomicanja regulacijskog polužja goriva.

Control mode	Typical system responses	Advantages/disadvantages
<b>On / off</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Inexpensive</li> <li>▪ Simple</li> <li>▪ Operating differential can be outside of process requirements</li> </ul>
<b>Proportional P</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Simple and stable</li> <li>▪ Fairly high initial deviation (unless a large P-band is chosen), then sustained offset</li> <li>▪ Easy to set up</li> <li>▪ Offset occurs</li> </ul>
<b>Proportional plus Integral P + I</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No sustained offset</li> <li>▪ Increase in proportional band usually required to overcome instability</li> <li>▪ Possible increased overshoot on start-up</li> </ul>
<b>Proportional plus Derivative P + D</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Stable</li> <li>▪ Some offset</li> <li>▪ Rapid response to changes</li> </ul>
<b>Proportional plus Integral plus Derivative P + I + D</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Will give best control, no offset and minimal overshoot</li> <li>▪ More complex to set up manually but most electronic controllers have an 'autotune' facility.</li> <li>▪ More expensive where pneumatic controllers are concerned</li> </ul>

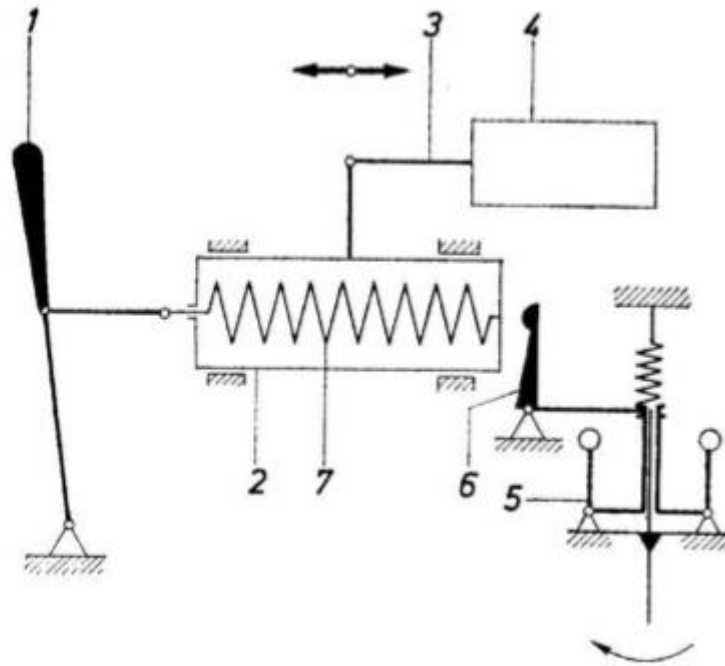
**Slika 6. Prikaz signala u ovisnosti o vremenu pojedinih tipova reguliranja [6]**

Postoji još jedna važna podjela regulatora, a to je podjela regulatora prema namjeni i radnom režimu. Prema toj podijeli regulatore dijelimo na jednorežimne, sverežimske i granične regulatore.

Jednorežimni regulatori podržavaju samo jedan brzinski režim rada i ti regulatori se upotrebljavaju kod pomoćnih motora, odnosno motora za pogon generatora struje. Razlog tome je što generirani napon ovisi o brzini vrtnje i on mora biti konstantan i zbog toga brzina vrtnje tog motora mora biti konstantna. Isto tako, mogu se koristiti i za pogon porivnog stroja koji pogoni propeler s upravljivim usponom krila zato što ti sustavi rade prema generatorskoj karakteristici [6].

Drugi tip regulatora po ovoj podjeli je sverežimski regulator. Takav režim podržaje bilo kakav ravnotežni režim rada, odnosno bilo koje brojeve okretaja motora bez obzira vozi li brod krmom ili pramcem. Obavezno se koriste za porivne motore.

Treći tip regulatora je granični, odnosno sigurnosni regulator. Takav tip regulatora se uključuje u rad samo ako broj okretaja motora dostigne vrijednost veću od dopuštene. On će isključiti motor iz pogona, te sprječava povećanje broja okretaja preko 10-15% od nominalnog broja okretaja motora [12]. Drugim riječima, sprječava overspeed motora.



Slika 7. Sigurnosni regulator [12]

- 1 – Ručka
- 2 – Kućište
- 3 – Polužje
- 4 – Dobavna sisaljka
- 5 – Regulator
- 6 – Poluga
- 7 – Opruga

### 3. SUSTAVI REGULACIJE BRODSKIH MOTORA

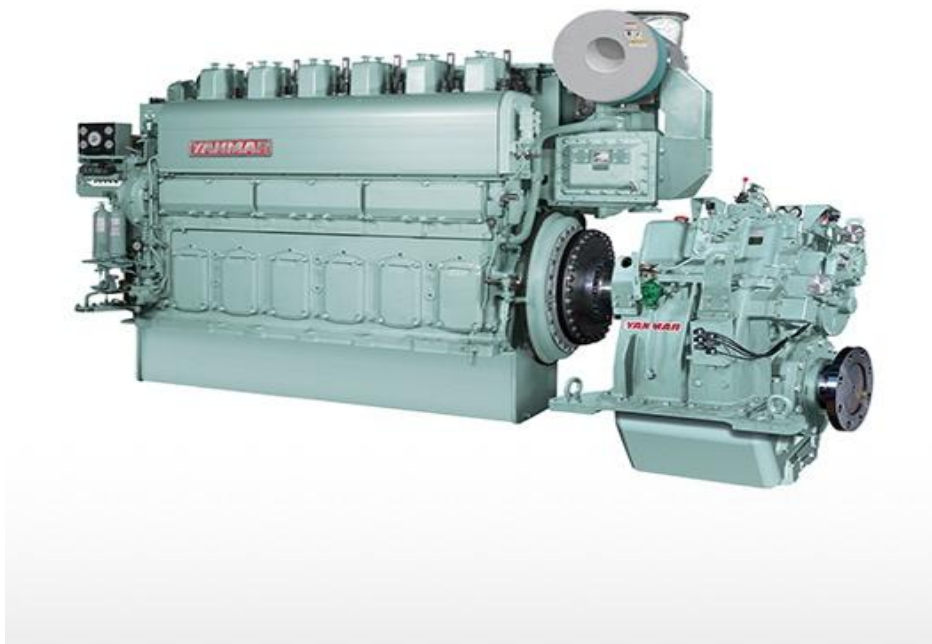
Najčešća izvedba porivnih sustava je sa sporohodnim dizel motorom koji direktno pokreće brodski vijak s fiksnim krilima. FPP je najrašireniji tip brodske propulzije, te imaju visok stupanj iskoristivosti, do 75%. Brodovi koji su opremljeni ovakvim tipom broskog vijka moraju imati prekretni motor za vožnju krmom.



**Slika 8. Sporohodni dizel motor [21]**

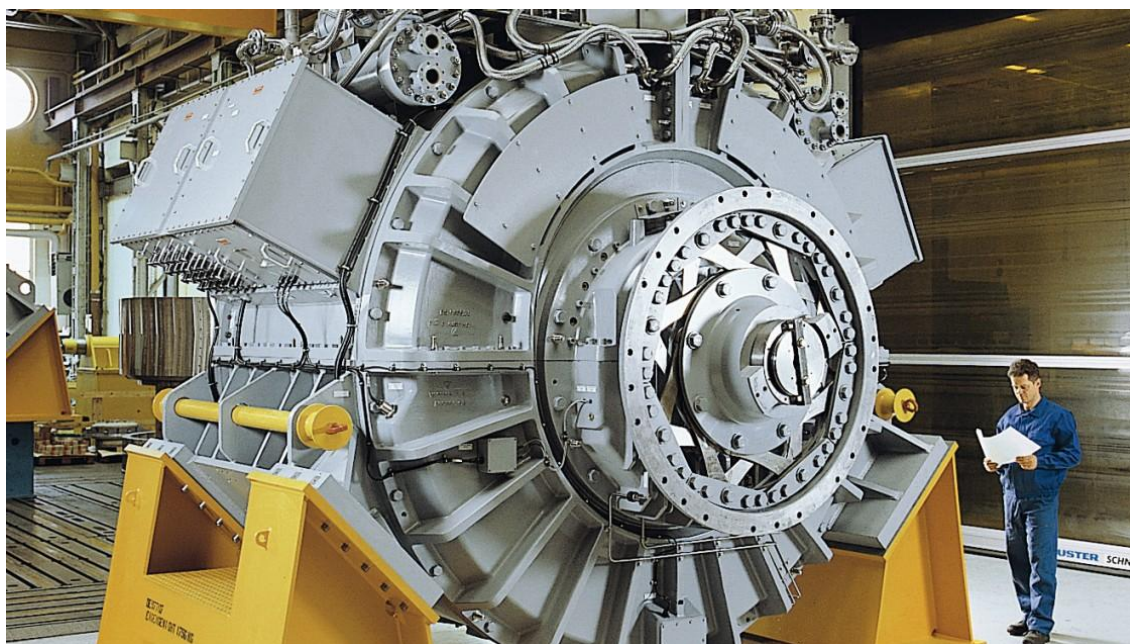
Na brodovima se još koriste i srednjohodni dizel motori koji preko reduktora pogone vijak s fiksnim i upravljivim krilima. VPP koristi kut krila za kretanje broda. Osovina se kreće konstantim brojem okretaja pa se kutom krila regulira brzina broda, usporavanje broda i vožnja krmom. U sustavima regulacije brzine vrtnje porivnih motora s VPP se koriste jednorežimski regulatori jer ti sustavi rade prema generatorskoj karakteristici [5].





**Slika 9. Brodski motor s reduktorom [22]**

Također, u novije vrijeme sve su učestaliji porivni sustavi s elektromotorom kod kojih energiju proizvode sinkroni generatori koje pogone četverotaktni dizel motori koji moraju raditi na sinkronoj brzini vrtnje bez obzira na promjenu opterećenja.



**Slika 10. Porivni elektrkomotor [23]**

Kod Wärtsilä elektromotora, regulacije brzine propulzijskog i potisnog motora ostvaruje se preko frekvencijskih pretvarača s impulsnom modulacijom u visokonaponskoj ili niskonaponskoj tehnologiji. U standardnom sustavu, pretvarači su projektirani s diodnim ispraljačem na strani mreže, bipolarnim tranzistorom s izoliranim vratima ili tiristorskim inverterom s komutiranim vratima na strani motora, istosmjernim kondenzatorima u međukrugu i sustavom upravljanja. Svaki pogon s impulsnim pretvaračem opremljen je s upravljačkom pločom pogonskog motora koja kontrolira i nadzire pogon, te osigurava zadanu vrijednost zakretnog momenta putem veze sabirnice na upravljački impulsni pretvarač [25].

### **3.1. PRAVILA REGISTRA**

Inženjerski rad u brodogradnji ne može se provoditi samo na osnovi pretpostavke o sposobnosti proizvođača, nego je praksa dovela do uspostave kontrolnih mehanizama koji institucioniziraju najviše tehničke zahtjeve utemeljene na iskustvu i teoriji. Zahtjevi međunarodnih pomorskih konvencija, kao i nacionalnih propisa traže da brodovi moraju biti projektirani, izgrađeni i održavani u skladu s odgovarajućim tehničkim propisima glede trupa, opreme trupa, strojnog uređaja, električne opreme i uređaja za upravljenje donesenih od stručne tehničke ustanove [7]. Te tehničke ustanove zovemo klasifikacijska društva, odnosno Registri.

U tu svrhu klasifikacijska društva su uspostavila sustav pravila za klasifikaciju brodova sukladno kojima brod mora biti nadziran tijekom gradnje.

#### **3.1.1. Regulatori brzine i zaštitni uređaji prekoračenja brzine za motore s unutaršnjim izgaranjem**

Po Registru, svaki glavni motor mora biti opremljen regulatorom brzine podešenim tako da broj okretaja motora ne može premašiti nazivnu brzinu za više od 15%. Uz ovaj regulator brzine, svaki porivni motor nazivne snage od 220 kW i više, a koji se može isključiti ili koji pokreće vijak s kontroliranim nagibom krilaca, mora biti opremljen zasebnim zaštitnim uređajem za prekoračenje brzine podešenim tako da brzina motora ne može prijeći nazivnu brzinu za više od 20% [4]. Ekvivalentni aranžmani mogu se prihvatiti uz posebnu pažnju. Zaštitni uređaj, uključujući njegov pogonski mehanizam, mora biti neovisan o potrebnom regulatoru.

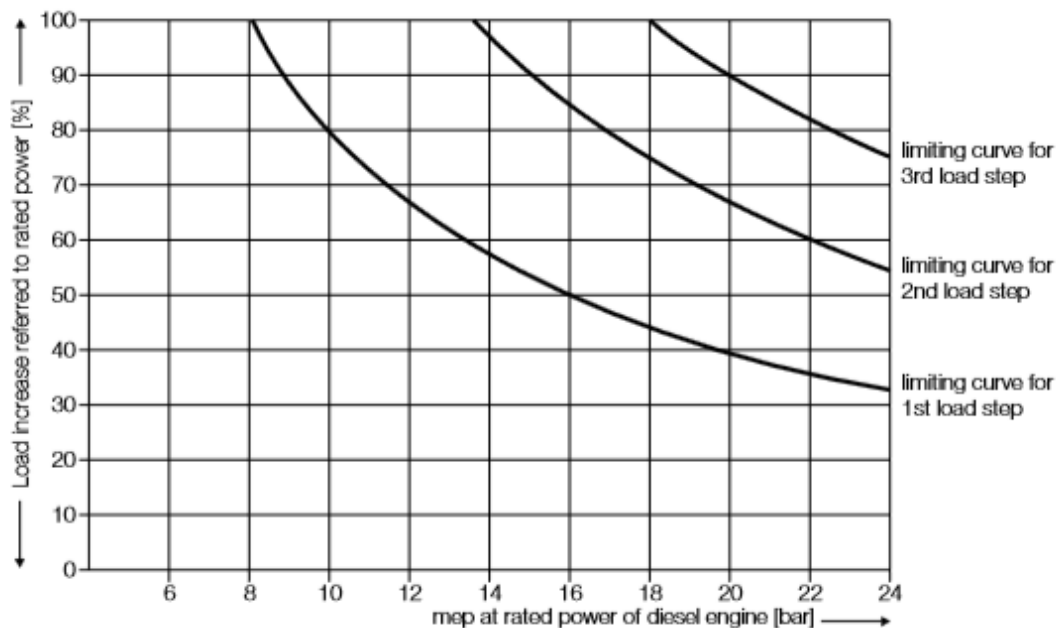


Kada elektronički regulatori brzine glavnih motora s unutarnjim izgaranjem čine dio sustava daljinskog upravljanja, oni moraju biti u skladu sa sljedećim uvjetima:

- ako nedostatak napajanja regulatora može uzrokovati velike i nagle promjene trenutne brzine i smjera potiska propelera, potrebno je osigurati rezervno napajanje
- lokalno upravljanje motorima uvijek mora biti moguće, a u tu svrhu, s položaja lokalnog upravljanja moguće je isključiti daljinski signal, imajući na umu da kontrola brzine nije dostupna osim ako nije osiguran dodatni zasebni regulator za takav lokalni način kontrole,
- električni regulatori brzine i njihovi aktuatori moraju biti tipski ispitani.

Također, važno je znati da nazivna snaga motora i njegova nazivna brzina su one za koje je zatražena klasifikacija instalacije [4].

Slika 11 prikazuje granične krivulje opterećenja četverotaktnih dizel motora korak po korak, od praznog hoda do nazivne snage motora, kao funkcije srednjeg efektivnog tlaka kočnice.



Slika 11. Granične krivulje opterećenja četverotaktnog dizel motora [4]

### 3.1.2. Pravila Hrvatskog registra brodova za proračun debljine krila broskog vijka

Bilo da se radi o jednodijelnom broskom vijku, broskom vijku s fiksnim krilima ili broskom vijku s upravljivim usponom, debljina presjeka krila ne smije biti manja od iznosa dobivenog po izrazu [2]:

$$s = 3,67A \sqrt{\frac{k}{z \cdot b} \cdot \frac{P_p}{R'_m \cdot n}} + \frac{c \cdot m \cdot 9,81}{R'_m} \left(\frac{D \cdot n}{300}\right)^2 \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

gdje je:

A – koeficijent koji se određuje ovisno o udaljenosti presjeka od središta r, te omjra odgovarajućeg uspona i promjera H/D, pri čemu se međuvrijednosti mogu odrediti iz:

$$A = 235,630127 - 89,3916433r/R - 203,659692 \cdot (r/R)^2 + [-167,358511 + 157,198164 \cdot r/R + 60,7248508 \cdot (r/R)^2] \cdot (H/D) + (52,732298 - 69,0823521 \cdot r/R) \cdot (H/D)^2;$$

z – broj krila;

b – širina razvijenog valjkastog presjeka [m];

$P_p$  – proračunska snaga na vratilu broskog vijka [kW];

n – proračunska brzina vrtnje broskog vijka [ $\text{min}^{-1}$ ];

$R'_m = 0,6R_m + 175$  [ $\text{N/mm}^2$ ];

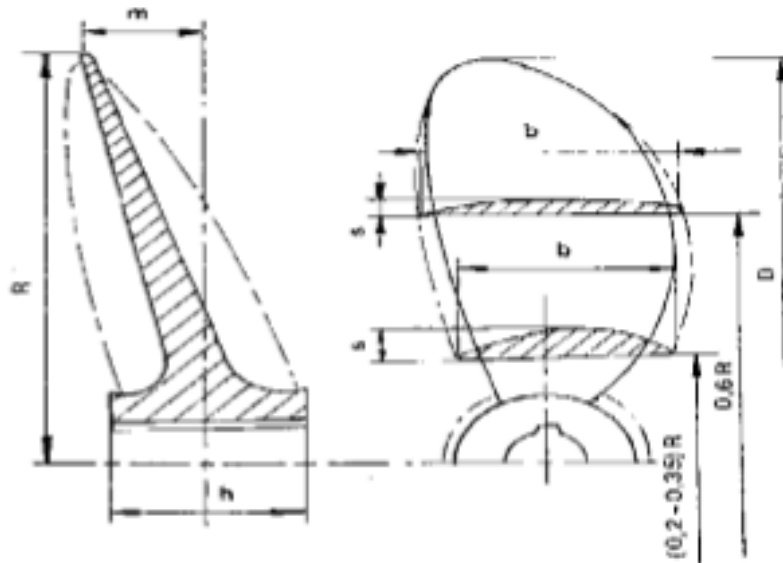
$R'$  – vlačna čvrstoća materijala krila [ $\text{N/mm}^2$ ];

c – koeficijent naprezanja uslijed centrifugalnih sila;

m – nagib krila [mm];

D – promjer vijka [m].

Debljina krila provjerava se za presjek u korijenu krila i za presjek na polumjeru 0,6R (Slika 12.).



**Slika 12. Presjek brodskog vijka [2]**

### **3.2. SUSTAV REGULACIJE PORIVNOG MOTORA S VIJKOM S FIKSNIM KRILIMA**

Suvremeni glavni brodski motori moraju imati ugrađen sverežimski regulator, neizravnog djelovanja kada je u pitanju sporohodni porivni stroj s vijkom s fiksnim krilima. Sustav se sastoji od glavnih regulatora brzine vrtnje koji djeluju direktno na letvu goriva i tako reguliraju dotok goriva u motor, odnosno na kraju i samu brzinu vrtnje motora.

S napredovanjem tehnologije došlo je do noviteta i u pomorskoj industriji. Jedan od takvih je i sustav promjenjivog vremena ubrizgavanja koji automatski, s obzirom na zadane parametre i opterećenja, ubrizgava gorivo u cilindre u vremenu koje je najpovoljnije za rad motora. Samim time je i isplativija potrošnja. Vremenom ubrizgavanja mijenja se i brzina vrtnje motora. Također, VIT sustav mijenja i kut ubrizgavanja goriva u cilindar u svrhu što veće iskoristivosti motora.

Common rail sustav je korak naprijed od VIT sustava. Dopušta automatizaciju i jednostavnije upravljanje ubrizgavanja goriva u cilindre glavnog motora. Za razliku od starijih sustava, svaka visokotlačna pumpa ubrizgava gorivo u cilindre pod istim tlakom.

#### **3.2.1. Izvedbe brodskih regulatora**

Brodski reglatori brzine su sastavni dio sustava ubrizgavanja goriva u dizelskim motorima. Općenito, regulator ubrizgavanja goriva osigurava da dizelski motor radi pri

unaprijed određenoj brzini pri različitim opterećenjima. Dopuštenja odstupanja su vrlo mala, pogotovo kod dizelskih generatora, koji zahtijevaju konstantnu frekvenciju. Također, regulator brzine je odgovoran za ispravan i siguran broj okretaja motora i kao takav je neophodan za svaki dizelski motor.

Regulatori brzine imaju sljedeće funkcije:

- kontrola količine goriva pri pokretanju motora
- kontrola količine goriva tijekom praznog hoda motora
- održavanje konstantne brzine pri promjenjivom opterećenju, primjerice u pogonskim sustavima s različitim teretima ili tijekom različitih vremenskih uvjeta
- osiguravanje da se ne prekorači maksimalni broj okretaja motora, jer to može uzrokovati štetu.

S obzirom na njihov rad, razlikujemo tri različite vrste regulatora brzine:

- mehanički (centrifugalni) regulatori
- hidraulički regulatori
- pneumatski regulatori
- električni (digitalni) regulatori.

Često nailazimo i na kombinacije tipova regulatora.

### **3.2.2. Mehanički regulatori brzine**

Mehanički ili, kako ih se još naziva, centrifugalni regulatori se koriste još od pojave prvih parnih strojeva, parnih turbina i motora s unutarnjim izgaranjem. Danas se pretežno koriste u malim motorima kategorija I i II. To je zbog toga što su pouzdani i relativno jeftini. Njihov rad se temelji na načelu kojeg je prije više od 200 godina formulirao poznati fizičar James Watt.

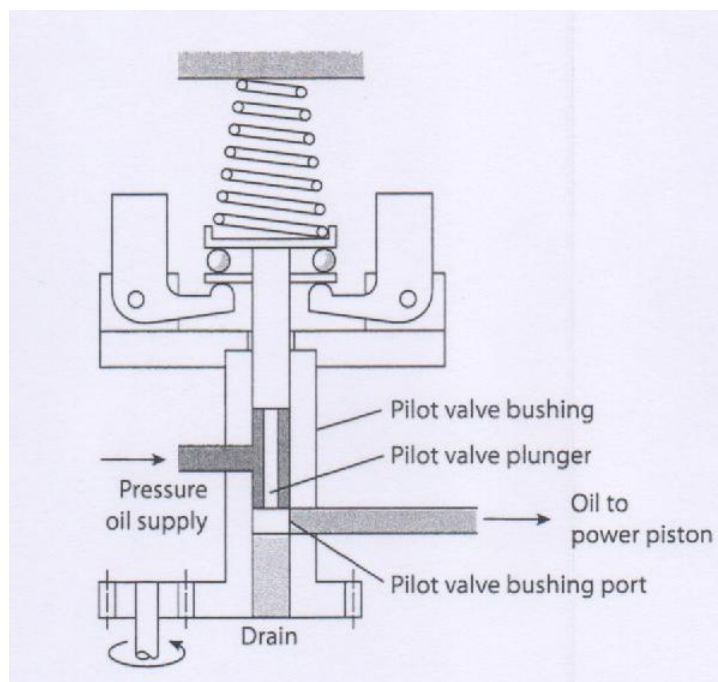
Postoje dva tipa ovih izvedbi regulatora:

- opruge kojima se može postaviti brzina su utjelovljene u rotirajućoj masi
- opruge su smještene izvan rotirajuće mase.

Većina mehaničkih regulatora djeluje unutar malog odstupanja. Odstupanje je između 2% i 10%, te ovisi o vrsti aktiviranja i tipu motora [8].

Brzina se postavlja pomoću opruge. Što je veći pritisak na oprugu, veća je brzina. Isto tako, što je veći otpor opruge, veća se količina goriva dovodi u motor.

Mjerenje brzine se provodi tako da regulator mora zaprimiti silu proporcionalnu brzini motora. To se odvija pomoću centrifugalnih sila zamašnjaka, koji se rotacijski pokreću mehaničkim spojem na motor.



**Slika 13. Radni princip mehaničkog regulatora [8]**

Cijeli uređaj se pokreće motorom odozdo. Zamašnjaci regulatora zakreću se prema van vršeci pritisak na upravljački ventil, čime se potiskuje opruga. Ako broj okretaja motora iznosi manje od onoga unaprijed postavljenog, opruga se proteže i silom otvara upravljački ventil, što uzrokuje da klip dopušta veću dobavu goriva u motor. Motor ubrzava do neznatno veće vrijednosti od one unaprijed određene i manje-više radi tom brzinom.

### **3.2.3. Hidromehanički regulatori brzine**

Kod ovakve izvedbe regulatora, sile za podešavanje kontrole kapaciteta pumpe goriva se ne osiguravaju izravno od mjernog uređaja, već od hidrauličkog sustava, koji omogućuje dodavanje dodatnih značajki regulatoru.

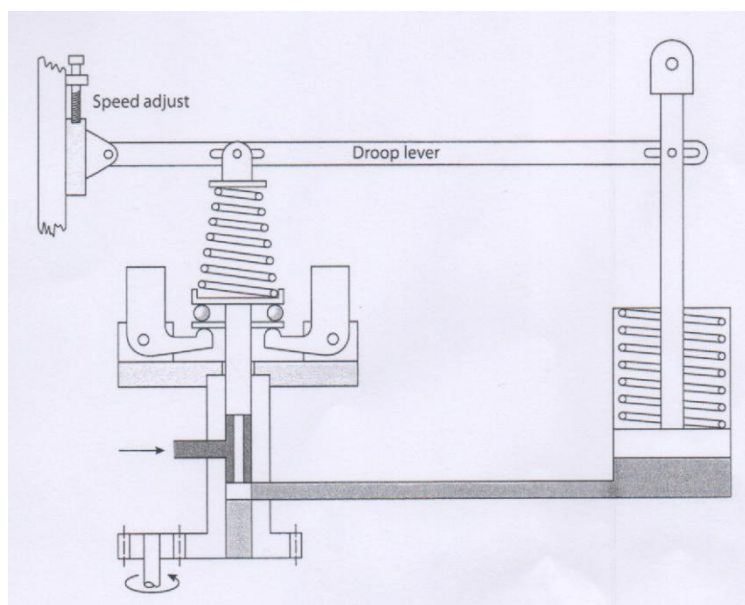
Hidromehanički regulatori obično imaju rotirajuću osovinu koja je pričvršćena na osovinu za podešavanje goriva motora. Kada regulator treba odraditi promjenu kako bi zadržao brzinu ili opterećenje, izlazno vratilo se pomiče u željenom smjeru. Pri stalnoj

opskrbi gorivom motor generira određenu izlaznu snagu. Obično, regulator mjeri brzinu i prilagođava dovod goriva, te na taj način mijenja izlaznu snagu [8].

Povećanjem brzine, zmašnjaci se okreću dalje prema van i smanjuje se dovod goriva u motor. Brzina se tada vraća na zadanu vrijednost. Naravno, ista stvar se događa i u suprotnom slučaju. Pri smanjenoj brzini utezi se okreću prema unutra, povećava se opskrba gorivom prema motoru i broj okretaja raste na željenu vrijednost. Trenje u sustavu proizvodi vremensko kašnjenje prije promjene brzine. Ta pojava se naziva “dead band”, a opisuje se kao interval signalne domene gdje se ne događa nikakva radnja [16].

Kod većih motorima zamašnjaci nemaju dovoljnu silu da opslužuju veće sustave goriva. Za rad s tim sustavima goriva često se koristi rotirajuća osovina za podešavanje goriva, pomoćni hidraulički sustav. Otuda i dolazi izraz, hidromehanički regulator. Većina ovih regulatora pokreće pumpu hidrauličkog ulja. Takve pumpe najčešće budu zupčaste izvedbe [11].

U svijetu regulatora koriste se mnogi čudni izrazi. Jedan od njih je i “droop brzine”. Droop je sustav koji sprječava prekomjernu promjenu brzine oko zadane vrijednosti. To se zove “hunting” [8]. Droop osigurava da motor održava stabilnu brzinu vrtnje unatoč promjenjivim opterećenjima. Kod mnogih regulatora droop se može postaviti na samom regulatoru.

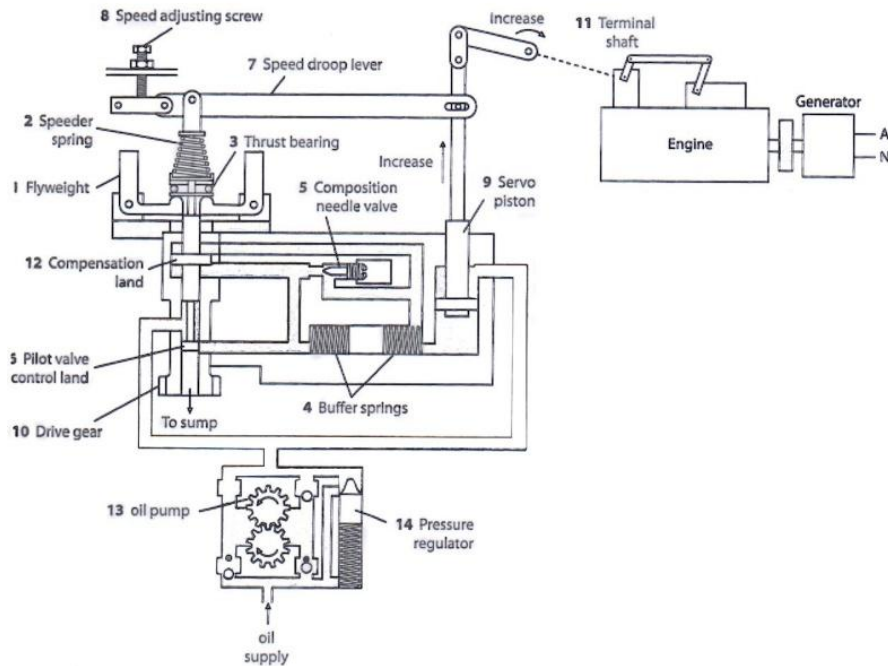


Slika 14. Hidromehanički regulator s droop polugom [7]

Matematički izraz za računanje droop-a glasi:

$$droop = \frac{\text{brzina bez opterećenja} - \text{brzina s punim opterećenjem}}{\text{nazivna brzina}}, \quad (2)$$

te se on izražava u postotcima (%) [6].



**Slika 15. Hidromehanički regulator električnog generatora pogonjenog dizel motorom**

**[8]**

- 1 – Utezi osjete brzinu glavnog pokretača
- 2 – Opruga koja služi kao sila za postavljanje željene brzine
- 3 – Aksijalni ležaj prima na sebe zbroj stvarne i željene brzine, droop i silu kompenzacijskog dijela
- 4 – Tampon opruge postavljaju pojačanje hidrauličkog kruga
- 5 – Iгла ventila stabilizira glavni pokretač
- 6 – Pilot ventil kontrolnog dijela regulira protok ulja prema servo klipu
- 7 – Droop poluga služi kao feedback servo klipa prema opruzi 2
- 8 – Vijak za podešavanje brzine postavlja željenu brzinu
- 9 – Servo klip služi kao sila koja pomiče terminalnu osovinu
- 10 – Pogonski zupčanik je spojen na motor za rotaciju čahure pilot ventila i kuglaste glave

11 – Terminalna osovina je rotacijski izlaz aktuatora koji služi za pomicanje polužja

12 – Kompenzacijski dio prenosi diferencijal sile na aksijalni ležaj kako bi pomogao povratu pilot ventila u središte kada se izvrši korekcija goriva

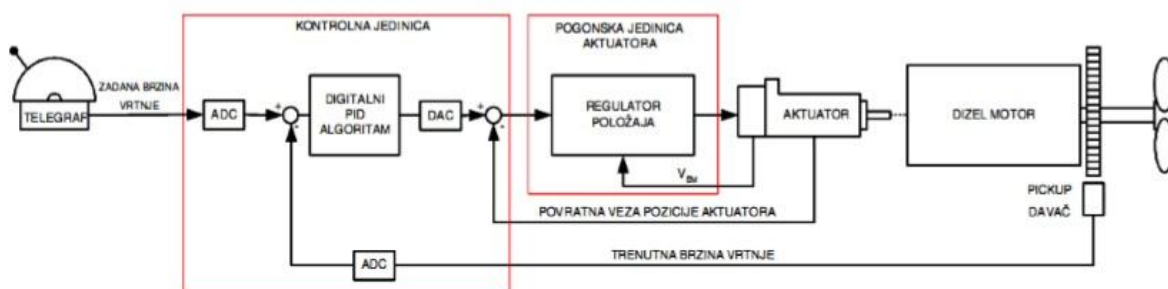
13 – Pumpa za ulje osigurava ulje pod pritiskom

14 – Regulator tlaka regulira tlak ulja iz pumpe.

### 3.2.4. Električni (digitalni) regulatori

Regulatori ovog tipa se često primjenjuju kod dizelskih motora kategorije III i kategorije IV, te sve češće kod dizelskih motora kategorije II. Osim kontroliranja zadane brzine, elektronički regulatori služe za brojne svrhe:

- izbjegavanje pretjerano velikih brzina
- ograničavanje maksimalne opskrbe gorivom
- ograničavanje maksimalnog tlaka ispirnog zraka
- kontroliranje aktiviranja propelerskog vijka s, na primjer, dva motora
- kontroliranje kašnjenja, na primjer, uključivanje spojnice ili općenito alarma.

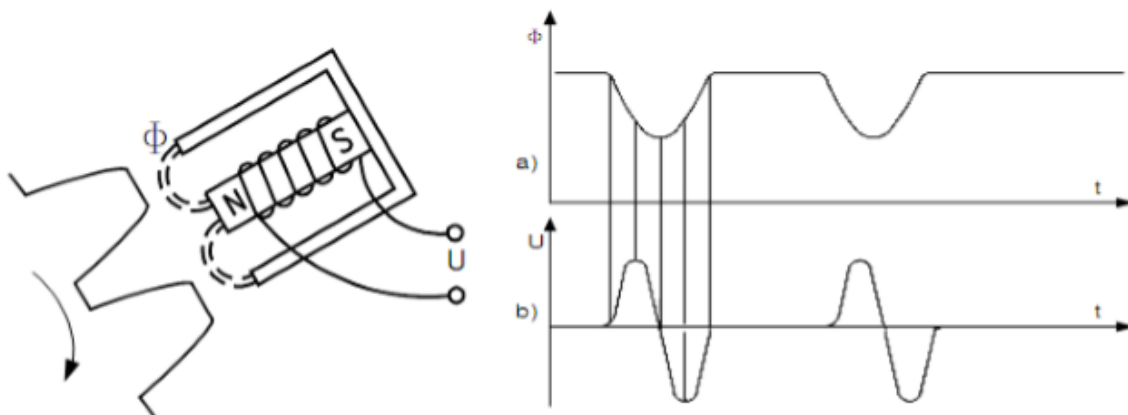


Slika 16. Shema sustava digitalnog upravljanja brzine vrtnje dizelskog motora [6]

Digitalni regulator se sastoji od kontrolne jedinice, pogonske jedinice aktuatora i samoga motora. Osnovni princip električnog regulatora je njegova usporedba zadane i stvarne brzine vrtnje motora. Pick-up davač mjeri frekvenciju na izlaznom vratilu motora i frekvencija se preko analognog digitalnog pretvarača pretvara u digitalni signal koji ulazi u digitalni PID algoritam. Iz tog digitalnog PID algoritma signal se pomoću digitalno analognog pretvarača pretvara u analogni signal i kao takav ide u regulator položaja koji tvori upravljačku jedinicu, te se dalje taj signal šalje na aktuator. Aktuator preko polužja goriva djeluje na polužje goriva djelujući na visokotlačne pumpe i na taj način se vrši regulacija brzine vrtnje motora.



Stvarna brzina motora mjeri se pomoću magnetnih pick-upova koji se najčešće ugrađuju u blizini zamašnjaka. Često je instalirano nekoliko (dva do četiri) pick-upa koji imaju različite namjene, od kojih je najvažnija slanje signala regulatoru. Broj signala ovisi o brzini motora i u praksi je često jednak broju zubaca na zamašnjaku koji prolaze preko pick-upa u jedinici vremena [8]. Ovakav sustav se često primjenjuje kod brzohodnih i sporohodnih četverotaktnih motora, dok je za sporohodne dvotaktne motora s križnom glavom ovaj sustav prespor, pa se koriste drugi sustavi.



**Slika 17. Shema pick-upa i dijagram promjene inducirano magnetnog toka i napona [6]**

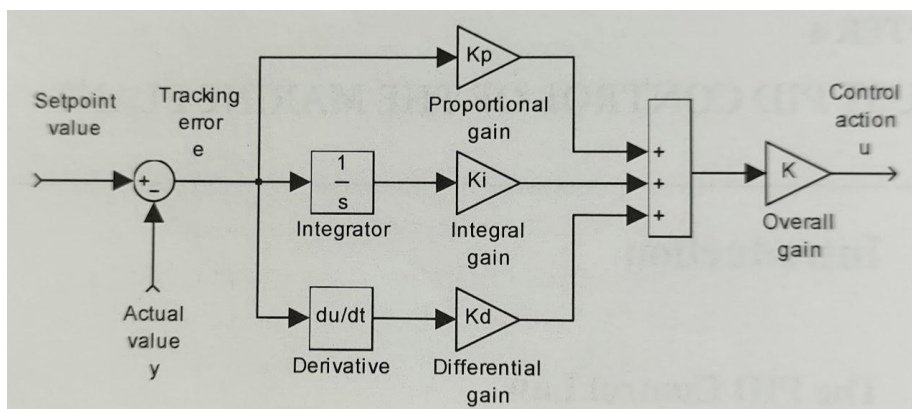
PID kontrolni zakon glavni je linearni modul koji djeluje u jezgri bilo kojeg digitalnog regulatora brzine brodskog motora, korištenog na brodu za regulaciju broja okretaja motora. Kao što mu ime kaže, ovaj kontrolni zakon generira pogonski signal na temelju vrijednosti pogreške praćenja  $e(t)$ , vremenskog integrala  $e(t)$  i, moguće, vremenske derivacije  $e(t)$ . Pogreška praćenja  $e(t)$  definirana je kao odstupanje kontroliranog izlaza stvarne vrijednosti  $y$  od njegove postavljene vrijednosti  $y_{set}$ , u bilo kojem trenutku  $t$ :

$$e(t) = y_{set}(t) - y(t) \quad (3)$$

Na temelju prošlih i trenutnih vrijednosti pogreške praćenja  $e(t)$ , linearni PID kontroler generira kontrolnu akciju  $u(t)$  danu po sljedećoj relaciji [5]:

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \cdot \int_{t_0}^t e(\varepsilon) d\varepsilon + K_D \cdot \frac{d}{dt} e(t), \quad (4)$$

gdje su konstante  $K_P$ ,  $K_I$  i  $K_D$  proporcionalna, integralna i derivacijska pojačanja kontrolnog zakona. Zbog postojanja ova tri uvjeta u jednadžbi kontrolnog zakona signala  $u(t)$ , PID kontrola se često naziva i troujetna kontrola [19].



**Slika 18. Blok dijagram PID kontrolnog zakona [19]**

Osnova PID kontrolnog zakona okružena je brojnim funkcionalnim modulima koji osiguravaju siguran rad elektrane i uređaja za daljinsko upravljanje. Ovi moduli su zapravo podređene upravljačke petlje za različite varijable pogonskih postrojenja. Oblik nametnute kontrole najčešće je on/off i koristi se za primjenu ograničenja na opterećenje motora, izraženog vrijednošću nazivnog indeksa goriva, kako bi se očuvao siguran rad i spriječio mogući kvar motora [19].

Jedan od povezanih funkcionalnih modula je onaj koji osigurava da se prijelaz broja okretaja motora kroz brojna područja s preprekama u radnom rasponu brzo izvede. Doista, takva područja okretaja prekidaju kontinuitet dopuštenog radnog raspona motora. Uzrok tome je to što, u određenim područjima, diskretna paljenja cilindra daju pobudu čija se frekvencija nalazi u neposrednoj blizini rezonantnih točaka sustava osovine [19].

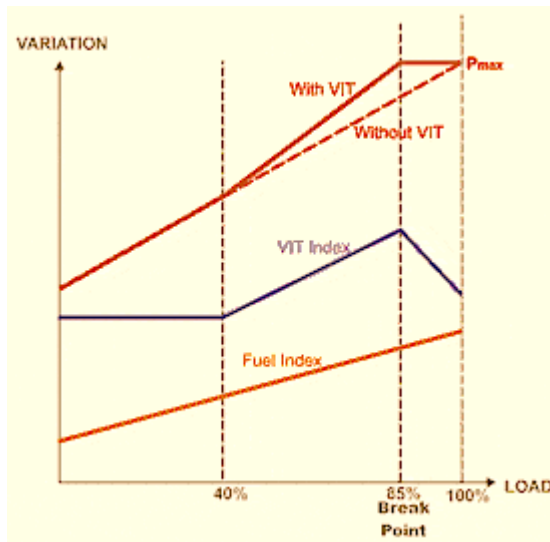
Još jedan funkcionalni modul modernih regulatora brodskih motora je kontrola zraka za pokretanje. Stlačeni zrak se dovodi u cilindre kada osovina miruje kako bi se pokrenula rotacija, odnosno kompresija u komorama za izgaranje. Zatim, ako je gorivo dovedeno, izgaranje može započeti i motor može ubrzati u normalnom ili obrnutom smjeru rotacije. Kontrola zraka za pokretanje motora uključuje koordinaciju svih radnji za pokretanje motora u normalnom ili obrnutom načinu rada, kao što su: prepoznavanje mirovanja osovine, upravljanje startnim zrakom pri pokretanju s pravilnim redoslijedom cilindara za normalnu ili obrnutu rotaciju, naredba za ubrizgavanje goriva, itd [19].

### **3.3. SUSTAV PROMIENJIVOG VREMENA UBRIZGAVANJA**

Funkcija promjenjivog vremena ubrizgavanja (VIT) brodskog dizelskog motora dolazi u obzir tijekom podešavanja tlaka izgaranja ovisno o opterećenju motora. VIT

omogućuje postizanje maksimalnog tlaka izgaranja tijekom djelomičnog opterećenja što pomaže u smanjenju potrošnje goriva i postizanju učinkovitog izgaranja u motoru [15].

Kontrolirajući vrijeme ubrizgavanja goriva u pumpu goriva i poboljšavajući vrijeme ubrizgavanja pumpe goriva VIT povećava maksimalni tlak u motoru.



**Slika 19. Dijagram tlaka izgaranja goriva u ovisnosti o vremenu sa i bez VIT-a [20]**

Regulator određuje trenutak početka ubrizgavanja tako da pomiče polugu VIT sustava, čime se po visini pomiče kućište pumpe na kojem je preljevni ventil. Početak dobave se određuje prema poziciji preljevnog ventila. Primjenom ovog sustava smanjuje se potrošnja goriva za 5,5 do 6,5 g/kWh pri 90% maksimalnog trajnog opterećenja [1].

VIT sustav omogućuje mijenjati početak ubrizgavanja na ranije i kasnije u odnosu na standardni sustav ubrizgavanja. Kod ranijeg početka ubrizgavanja maksimalni tlak se postiže pri 85% trajnog maksimalnog opterećenja. Nakon tih 85% opterećenja sustav se prebacuje na kasnije ubrizgavanje, kako bi održao stalan tlak izgaranja sve do 100% trajnog maksimalnog opterećenja. Za opterećenje manje od 40%, signal VIT sustava je jednak nuli da se izbjegnu česte promjene tijekom manevriranja [1].

VIT se koristi za smanjenje ukupne potrošnje goriva i za postizanje maksimalnog tlaka čak i pri malom opterećenju, ali loše održavanje i rad VIT-a mogu preokrenuti željeni rezultat, pa čak dovesti i do velikih oštećenja glavnih dijelova motora.

Prilikom rada s privnim motorom koji je opremljen VIT sustavom potrebno je poznavati pravilno rukovanje za nesmetan rad motora koji je opisan u sljedećim potpoglavljima.

### **3.3.1. Slobodnost mehaničkih dijelova**

Pokretač VIT sustava djeluje na pomicanje ekscentrične osovine usisnih ventila i ventila za kontrolu prosipanja. Potrebno je osigurati da ti ventili nemaju nikakvih prepreka, niti pretjeranog zračenja. Također je potrebno redovito provjeravati ispravnost rada opruge ekscentričnog vratila kako bi se izbjegao bilo kakav kvar.

### **3.3.2. Provjera vrijednosti indikatora opterećenja**

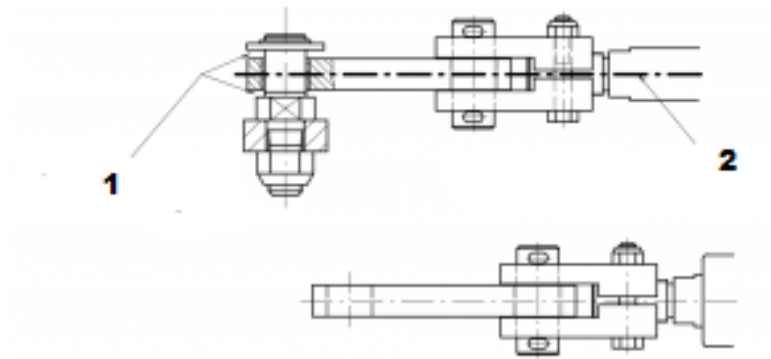
Regulacijska veza goriva prenosi kretanje izlazne poluge regulatora i prema tome određuje dovod goriva u cilindar. Potrebno je provjeriti podudarnost položaja pokazivača opterećenja na pločici za postavljanje koja se nalazi na zglobnom spoju i vrijednosti indikatora opterećenja na lokalnom manevarskom postolju i na položaju daljinskog upravljača kada je VIT postavljen na 0. Ako postoji odstupnje u bilo kojoj od tri vrijednosti, to se mora ispraviti prije početka bilo kakvih radnji na podešavanju vremena ubrizgavanja pumpe goriva.

### **3.3.3. Postavka VIT aktuatora**

Potrebno je provjeriti hod aktuatora kada je VIT u poziciji 0 umetanjem razmaknute čahure između poluge za regulaciju usisnog ventila i blokirne jedinice. Potom je potrebno pomaknuti VIT u njegov maksimalni položaj naprijed i minimalni položaj usporavanja, te zabilježiti vrijednosti koje se nalaze na indikatoru opterećenja na pločici za podešavanje. Na kraju se zabilježavaju sva odstupanja i uspoređuju se s propisanim vrijednostima u priručniku proizvođača.

### **3.3.4. Zazor VIT-a**

Prilikom postavljanja VIT-a nakon održavanja, potrebno je provjeriti razmak i poravnanje između granične ploče i poluge s cilindrom u potpuno povučenom položaju. Ako nema zazora, graničnik se mora brusiti dok se ne postigne zazor.



**Slika 20. Grafički crtež zazora VIT-a [20]**

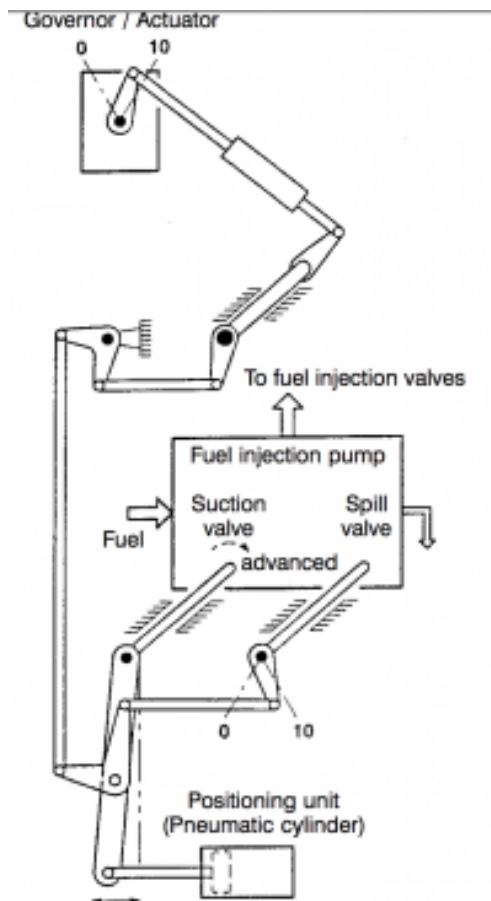
- 1 – Zazor obje strane pri svakom položaju VIT-a
- 2 – Pažljivo treba poravnjanje jedinice za pozicioniranje

### **3.3.5. Električni priključak**

Za VIT s elektroničkim upravljanjem svi kabelski spojevi između priključne kutije i terminal VIT-a moraju se redovno provjeravati.

### **3.3.6. Pneumatski cilindar**

Pneumatski cilindar koji djeluje kao jedinica za pozicioniranje VIT veze ponekad je opremljen mehaničkim zastojem koji treba provjeriti ima li zaglavljivanja. Ovo je korisno za ručno pomicanje cilindra u slučaju kvara sustava za automatsko pozicioniranje.



**Slika 21. Shema povezanosti pneumatskog cilindra s regulatorom [20]**

### **3.3.7. Period uhodavanja motora**

Kad je brodski dizelski motor u razdoblju uhodavanja zbog remonta dijelova motora, VIT bi trebao biti odspojen ili isključen cijelo vrijeme dok se popravak ne završi.

### **3.3.8. Motor radi s isključenom jedinicom**

Ako glavni motor radi s isključenom jedinicom zbog velikog problema u dijelovima te jedinice, VIT treba postaviti na 0 ili ga isključiti jer će u protivnom doći do neravnomjerne raspodjele opterećenja unutar motora.

### **3.3.9. Kvar VIT-a**

Kada dođe do kvara VIT-a, maksimalni tlak izgaranja više ne kontrolira pneumatski aktuator. Tijekom takve situacije rukav za udaljenost mora biti ugrađen kako bi fiksirao neutralni položaj VIT-a.

### 3.4. COMMON RAIL SUSTAV UBRIZGAVANJA

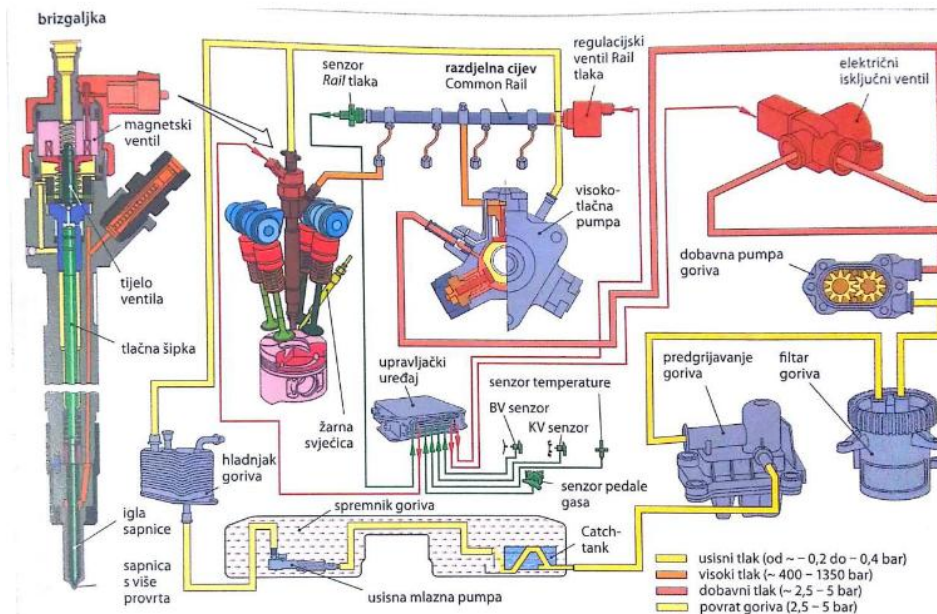
Common rail sustav ubrizgavanje se razlikuje od starijih modela sustava za ubrizgavanje goriva. Kod starijih sustava je svaka brizgaljka posebno spojena s visokotlačnom pumpom i svaka brizgaljka dobiva drugačije vrijednosti tlaka goriva. Common rail sustav skladišti gorivo u visokotlačnu cijev. Dalje se pomoću dovodnih visokotlačnih cijevi gorivo dovodi do svake brizgaljke pri jednakom tlaku goriva. Tlak goriva može iznositi do 2500 bara i ne ovisi o brini vrtnje motora. Common rail ubrizgavanje se koristi poljima vrijednosti pa se može kontrolirati i programirati. Proces ubrizgavanja se pravilnim programiranjem može unaprijediti da bi se postigla [5]:

- niža buka motora
- veća snaga motora
- viši okretni moment i pri maloj brzini vrtnje motora
- veća pouzdanost i dulji vijek trajanja motora
- visoka učinkovitost ubrizgavanja
- manje emisije štetnih plinova do te mjere da zadovoljavaju stroge ekološke norme
- manja potrošnja goriva
- primjena u svim granama prometa.

Common rail sustav čine četiri osnovna sustava [24]:

- visokotlačna pumpa s regulatorom tlaka
- visokotlačna cijev (Rail)
- brizgaljke
- električni upravljački uređaj za kontroliranje rada cijelog sustava.

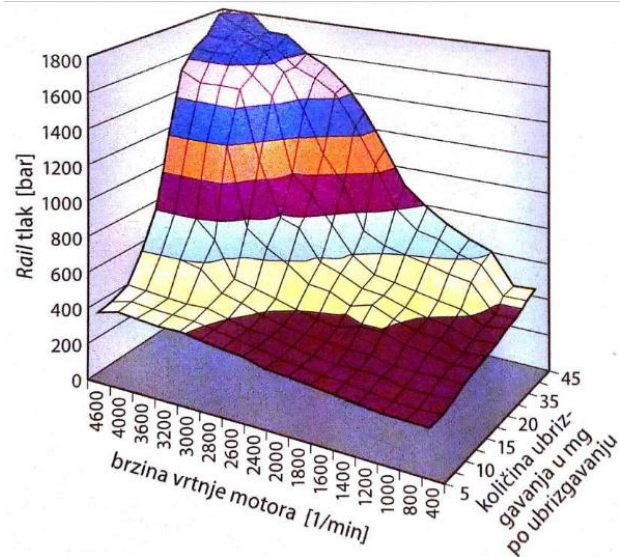
Osnovni dijelovi Common rail sustava su niskotlačni krug, visokotlačni krug i elektronika. Niskotlačni krug se sastoji od kruga dobavnog tlaka, dio tlaka preddobave i povrat goriva. Osnovni dijelovi ovog kruga su spremnik goriva, dobavna pumpa, predgrijavanje goriva, električni iskopni ventil, filter goriva i hladnjak. Visokotlačni krug čine visokotlačna pumpa, Rail, visokotlačne cijevi, te brizgaljke na svakom cilindru. Dok se električki sustav sastoji od upravljačkog sklopa, senzora, elektromagnetskih ventila brizgaljki, sklopnog ventila i senzora tlaka Common raila [5].



**Slika 22. Common rail sustav ubrizgavanja [5]**

Dobavna pumpa goriva crpi gorivo iz njegovog spremnika preko predgrijača goriva i filtera, te ga preko isključnog ventila šalje visokotlačnoj pumpi. Regulator rail tlaka regulira Rail tlak u ovisnosti o opterećenju i brzini vrtnje motora, te mapiranim vrijednostima. Brizgaljke ubrizgaju gorivo izravno u prostor izgaranja. Brizgaljke dobijaju gorivo bez pulsiranja tlaka zbog relativno velikog volumena razdjelne cijevi u odnosu na količine ubrizgavanja. Ubrizgavanje se provodi neovisno o položaju klipova motora. Tlak u zajedničkoj razdjelnoj cijevi se postavlja prema polju vijednosti u ovisnosti o brzini vrtnje i opterećenju motora [3].





**Slika 23. Omjer Rail tlaka i brzine vrtnje motora [5]**

U sustavima s mehaničkim ubrizgavanjem tlak ubrizgavanja ovisi o brzini vrtnje motora i opterećenju motora. Tlak opada pri malom opterećenju i to dovodi do vrlo velikih kapljica goriva koje preživljavaju kao takve sve dok ne stignu u površinu prostora za izgaranje. Common rail sustav održaje visok tlak ubrizgavanja pri svim opterećenjima sve do praznog hoda, a samim tim i postojanost sitnih kapljica goriva.

#### 4. PRIMJER REGULACIJE MOTORA WÄRTSILÄ 18V32

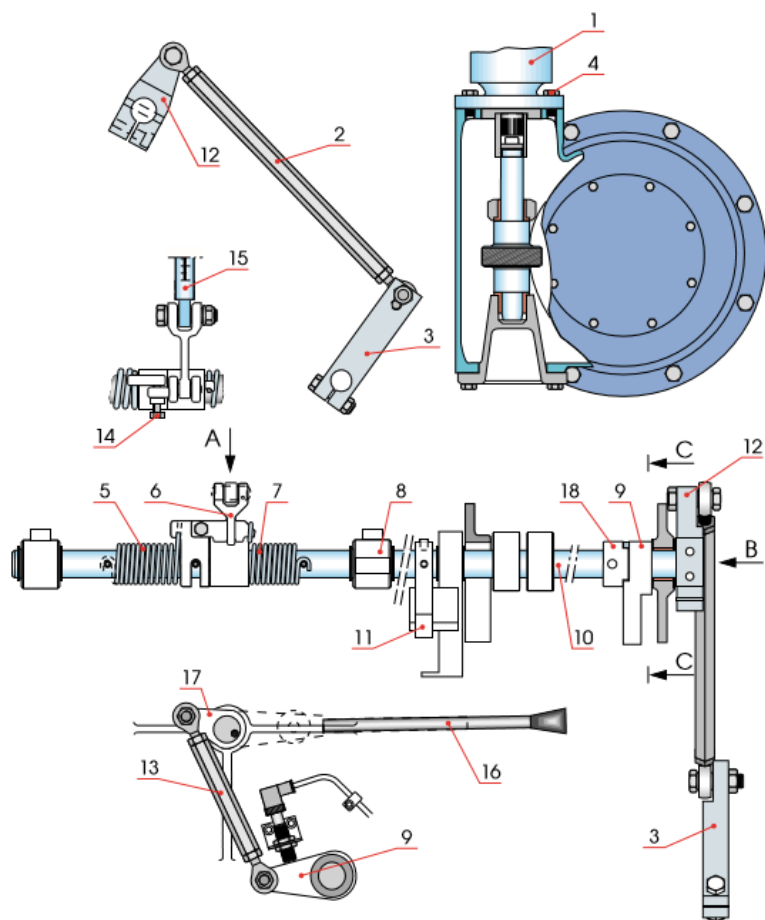
Tijekom normalnog rada, brzinu motora kontrolira regulator koji regulira količinu ubrizganog goriva kako bi odgovarala opterećenju i broju okretaja motora. Regulacijsko kretanje se prenosi na upravljačku osovinu preko podesivog polužja.

Kretanje od upravljačkog vratila, do nosača goriva pumpe za ubrizgavanje, prenosi se preko regulacijske poluge i opruge. Torzijska opruga omogućuje pomicanje upravljačke osovine, a time i ostalih nosača goriva u zaustavljeni položaj, čak i ako se jedan od nosača goriva zaglavi. Na isti način torzijska opruga omogućuje pomicanje regulacijskog vratila prema fuel-on položaju, čak i ako se pumpa za ubrizgavanje zaglavila u položaju bez goriva. Ova značajka može biti bitna u hitnoj situaciji.

Motor se može zaustaviti pomoću poluge za zaustavljanje. Kada se zaustavna poluga pomakne u zaustavni položaj, poluga pokreće drugu polugu tjerajući regulacijsko vratilo u zaustavni položaj.

Motor je opremljen elektropneumatskim uređajem s brzinom okidanja oko 15% iznad nazivne brzine. Elektropneumatski uređaj pomiče svaki stalak za gorivo u položaj bez goriva pomoću pneumatskog cilindra na svakoj pumpi za ubrizgavanje. Cilindar se aktivira izravno na nosač goriva. Elektropneumatski uređaj se može i ručno aktivirati.

Prilikom poretanja motora, regulator će automatski ograničiti kretanje regulacijskog vratila na odgovarajuću vrijednost. Regulator brzine ima zaustavni solenoid koji je spojen na WECS.



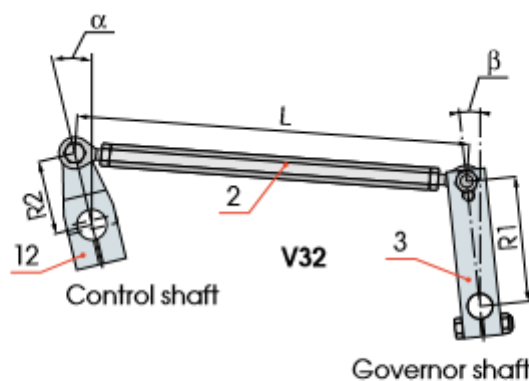
**Slika 24. Shema regulacijskog mehanizma Wartsilä 18V32 [18]**

- 1 – Regulator
- 2 – Podesivo polužje
- 3 – Poluga za regulator
- 4 – Vijak
- 5 – Torzijska opruga
- 6 – Poluga za pumpu za ubrizgavanje
- 7 – Torzijska opruga
- 8 – Kućište ležišta
- 9 – Poluga
- 10 – Upravljačko vratilo
- 11 – Graničnik opterećenja
- 12 – Poluga za upravljačku osovinu
- 13 – Podesivo polužje
- 14 – Vijak za podešavanje

- 15 – Nosač goriva
- 16 – Zaustavna poluga
- 17 – Poluga za zaustavnu polugu
- 18 – Dog

Regulator koji se koristi je hidromehaničkog tipa i pokreće ga zasebna pogonska jedinica, koju pokreće bregasta osovina preko zavojnih zupčanika. Regulator je pričvršćen na ovu pogonsku jedinicu i spojen na pogonsko vratilo preko nazubljene veze. Nazubljena spojna čahura pričvršćena je vijkom. Regulator, s pogonom, se može tako ukloniti i montirati kao cjelina ili se može promijeniti bez skidanja pogonske jedinice.

Ulje pod pritiskom vodi se, kroz bušotine u nosaču, do ležajeva i do mlaznice za podmazivanje zupčanika.



Engine type	Governor type	L (mm)	R1 (mm)	R2 (mm)	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	Rack h (mm)	Governor indicator
V32	PGA	486±20	124	73	14	3±4	0*	0*
	PG-EG							
	EGB							

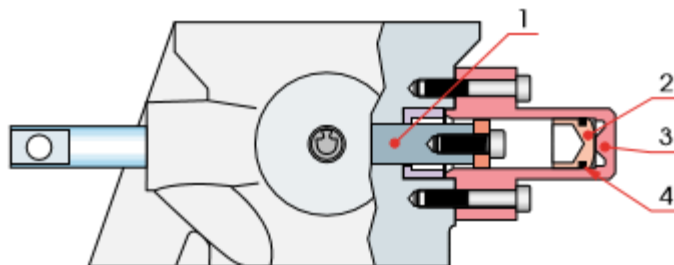
**Slika 25. Shema i postavke vratila regulatora [18]**

- 2 – Podesivo polužje
- 3 – Poluga za regulator
- 12 – Poluga za upravljačku osovinu

Uređaj za zaustavljanje prekoračenja brzine vrtnje je elektronički kontroliran. Zrak od maksimalno 30 bara se koristi kao radni medij. Brzina okidanja je 15% iznad nazivne brzine.

Trosmjerni elektromagnetni ventil dobiva signal zaustavljanja za prekoračenje brzine vrtnje motora od WECS-a. Kada se elektromagnetni ventil otvori, zrak se dovodi do

trosmjernog ventila, koji prenosi zrak pod tlakom u cilindre, po jedan za svaku pumpu za ubrizgavanje. Klip zračnog cilindra djeluje na nosač goriva pomičući ga u zaustavni položaj. Signal za zaustavljanje je uključen dovoljno dugo da potpuno zaustavi motor. Kada je bez napona, zrak se evakuira kroz trosmjerni ventil. Elektromagnetnim ventilom se također može upravljati ručno.



**Slika 26. Shema elektropneumatskog uređaja za zaustavljanje prekoračenja brzine [18]**

- 1 – Nosač goriva
- 2 – Klip
- 3 – Cilindar
- 4 – Klizni prsten

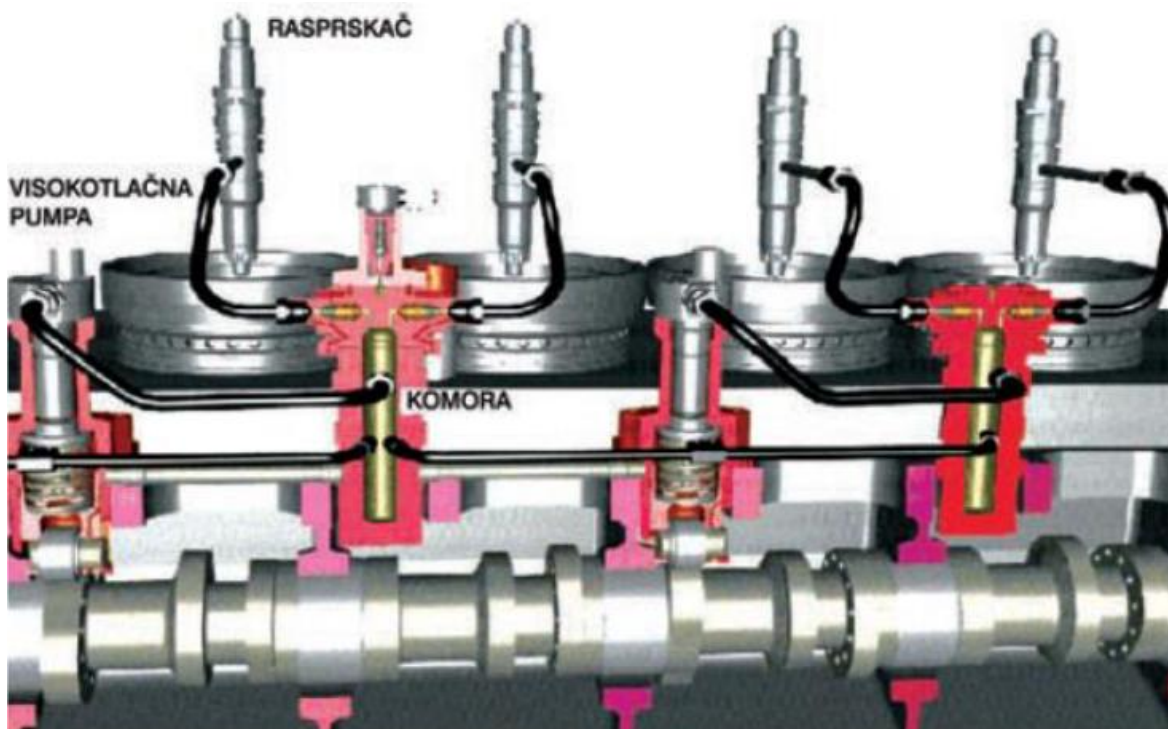
Brzina isključenja može se provjeriti na dvije različite metode, simulirajući signal brzine vrtnje motora pomoću generator signala ili pokretanjem motora i povećanjem broja okretaja motora. Preporučena metoda provjere je korištenje generator signala.

Provjera brzina isključenja povećavanje, broja okretaja motora iznad nazivne brzine vrtnje motora se izvodi savijanjem poluge za upravljačku osovinu odgovarajućim ključem u smjeru od motora. Kada se nazivna brzina postigne, a potom i prekorači, regulator počinje smanjivati postavku goriva, odnosno upravljačko vratilo mora biti savijeno prema sili regulatora.

#### **4.1. COMMON RAIL SUSTAV TVRTKE WÄRTSILÄ**

Ovaj sustav radi na način da booster gorivo dolazi pumpom do visokotlačnih pumpi koje se pogone razvodnim vratilom. Visokotlačna pumpa, kao i zajednička komora, postavljena je za svaka dva cilindra, a zbog povećanja zalihosti sustava i izjednačavanja tlaka, komore su međusobno povezane što pospješuje lakši rad motora ako dođe do prestanka rada pumpi. Kad tlak u visokotlačnim pumpama naraste do oko 1600 bara gorivo

će strujati kroz visokotlačne cijevi prema zajedničkim komorama, gdje će se akumulirati i time će se otkloniti tlačne oscilacije u sustavu [17].



**Slika 27. Common rail sustav tvrtke Wärtsilä [17]**

Sustav zajedničkog upravljanja se sastoji od sljedećih komponenti: Elektronički sustav upravljanja, visokotlačne pumpe, regulacijski ventili i brizgaljke. Gorivo pri konstantnom tlaku struji visokotlačnim cijevima do brizgaljke bez obzira na opterećenje motora i brzinu vrtnje motora. Gorivo se ubrizgava u cilindar u onom trenutku kada glavni sustav upravljanja pošalje elektronički signal brizgaljki. Početak ubrizgavanja i količina ubrizganog goriva određeni su isključivo glavnim elektroničkim sustavom upravljanja. Glavna razlika između visokotlačnih pumpi u Common rail sustavu i onih u standardnim sustavima ubrizgavanja je u random tlaku koji u Common rail sustavu iznosi 1600 bara. U standardnom sustavu ubrizgavanja pumpa služi za određivanje vremena ubrizgavanja i količine ubrizganog goriva, dok ona u Common rail sustavu služi za konstantno održavanje tlaka. Kod Common rail sustava na vratilu su tri brijega, a kod standardnog sustava su jedan ili dva. Regulacijski ventil se postavlja između svake brizgaljke i zajedničke komore, a isti je elektromagnetskog tipa. Glavna funkcija regulacijskog ventila je zaštita igle brizgaljke i propuštanje određene količine goriva u određenom trenutku. Sve to utječe na prevenciju propuštanja goriva u cilindar i zaštitu brizgaljke od visokog tlaka [17].

Unutarnji otvori cijevi Common rail sustava su posebno oblikovani zbog smanjenja naprezanja. Kroz zasebnu jednicu za kontrolu ubrizgavanja se dovodi gorivo do zajedničke komore za svaki pojedini cilindar. Ona se sastoji od Sulzerovog elektrohidrauličnog ventila i regulacijskog ventila za svaki cilindar. WESC šalje signal prema elektrohidrauličnom ventilu koji određuje početak i završetak ubrizgavanja. Regulacijski ventili se ne razlikuju od ventila na klasičnim RTA motorima, a na svakom cilindru je svaki regulacijski ventil reguliran pomoću kontrolne jedinice za ubrizgavanje [17].

## 5. ZAKLJUČAK

U lovu na što bolju ekonomsku računicu pomorske industrije, brodari potežu za što naprednijim tehnologijama kako bi to ostvarili. Iskoristili su automatsku regulaciju za održavanje najučinkovitije iskoristivosti pogonskog motora.

U ovom radu opisana je automatska regulacija, kao i sredstva te regulacije. Za svaki tip motora postoje tipovi regulatora koji se koriste za reguliranje brzine vrtnje tih motora. Kod sporohodnog dvotaktnog motora s vijkom s fiksnim krilima koristimo mehaničke, hidromehaničke i digitalne, odnosno električne regulatore. Ti regulatori, kao i sve ostale brodske komponente koje se ugrađuju na brodove moraju biti odobreni od strane Registra, odnosno moraju poštovati dane regulative od strane nadležnih klasifikacijskih društava. Sve je učestalija uporaba digitalnih regulatora, koji osim regulacije dotoka goriva mogu regulirati brzinu vrtnje pomoću kontroliranja startnog zraka i sličnih povezanih modula.

VIT sustav je još jedan od načina reguliranja brzine vrtnje glavnog motora. U današnje vrijeme se koristi dosta često uz uobičajene regulatore. Služi kao modernizacija i poboljšanje sustava regulacije brzine vrtnje glavnog broskog motora pomoću automatizacije ubrizgavanja goriva u cilindar na osnovi zadanih parametara. Korak dalje od VIT sustava je Common rail sustav. Taj sustav za razliku od starijih sustava koristi zajedničku cijev, te svaka visokotlačna pumpa ubrizgaje gorivo pod istim tlakom. Također, Common rail sustav se može mapirati i programirati, što uvelike pomaže u automatizaciji motora, te kontroliranju njegova rada.

Motor tvrke Wärtsilä, oznake 18V32, automatiziran je preko WESC-a i kao regulatore koristi hidromehanički tip regulatora, koji su također opremljeni elektropneumatskim uređajem za zaustavljanje prekoračenja brzine.



## LITERATURA

- [1] Bukovac, O.: *Predviđanje parametara rada brodskog dizelskog motora primjenom neuronskih mreža*, Tehnički fakultet u Rijeci, Rijeka, 2012.
- [2] Croatian Register of Shipping: *Requirments Concerning Machinery Installations*
- [3] Fischer, R.: *Fachkunde Kraftfahrzeugtechni*, Europa-Lehrmittel, Haan, 2013.
- [4] International Association of Classification Societis: *Requirments Concerning Machinery Installations*
- [5] Josipović, I.: *Analiza elektronskih sustava za ubrizgavanje goriva*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2018.
- [6] Komar, I.: *Prezentacije s predavanja Brodski motori*
- [7] Komar, I.: *Prezentacije s predavanja Tehnički nadzor i klasifikacija*
- [8] Kuiken, K.: *Diesel Engines for Ship Propulsion and Power Plants*
- [9] Kuo, BC.: *Automatic Control System*, Prentice Hall, New Jersey, 1987.
- [10] Lalić, B.: *Prezentacije s predavanja Priprema i upravljanje postrojenjem*
- [11] Ozretić, V.: *Brodski pomoćni strojevi i uređaji*, Split Ship Management Ltd., Split, 1995.
- [12] Pažanin, A.: *Brodski motori*, Školska knjiga Zagreb, Zagreb, 1990.
- [13] Petrić, J.: *Automatska regulacija: Uvod u analizu i sintezu*, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zagreb, 2012.
- [14] Radica, G., Grljušić, M.: *Brodski pogonski strojevi*, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu, Split, 2017.
- [15] Šurina, T.: *Teorija automatske regulacije*, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zagreb, 1970.
- [16] Tomas, V.: *Osnove automatizacije*, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2010.
- [17] Ulaga, N., Milić, L., Jelić, M.: *Sustavi dobave goriva u brodskim dizelskim motorima*, NAŠE MORE: znanstveno-stručni časopisa za more i pomorstvo, 55(3-4), 116-126, 2008.
- [18] *Wärtsilä 18V32 Instruction Manual*
- [19] Xiros, N.: *Robust Control of Diesel Ship Propulsion*, Springer Science + Business Media, London, 2002.
- [20] <https://www.marineinsight.com/main-engine/vit-marineengineer-must-know/>  
(pristupljeno 24.9.2021.)

- [21] <https://www.brodosplit.hr/hr/nasi-proizvodi/proizvodnja-dizel-i-Ing-motora/>  
(pristupljeno 21.10.2021.)
- [22] <https://www.navela.hr/hr/brodski-motori-i-reduktori/> (pristupljeno 21.10.2021.)
- [23] <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/industrial-applications/marine/electric-propulsion-and-drives.html> (pristupljeno 21.10.2021.)
- [24] [http://www.railway-energy.org/static/Common\\_Rail\\_37.php](http://www.railway-energy.org/static/Common_Rail_37.php) (pristupljeno 9.6.2022.)
- [25] <https://www.wartsila.com/marine/products/electrical-and-power-systems/electric-propulsion/electric-propulsion-systems> (pristupljeno 12.7.2022.)

## POPIS SLIKA

Slika 1. Shema upravljanja (otvoreni krug) [10] .....	2
Slika 2. Regulacijska petlja [10].....	3
Slika 3. Opći blok dijagram automatske regulacije [13] .....	4
Slika 4. Strukturna shema sustava automatske regulacije izravnog djelovanja [6].....	4
Slika 5. Strukturna shema sustava automatske regulacije neizravnog djelovanja [6].....	5
Slika 6. Prikaz signala u ovisnosti o vremenu pojedinih tipova reguliranja [6].....	6
Slika 7. Sigurnosni regulator [12] .....	7
Slika 8. Sporohodni dizel motor [21] .....	8
Slika 9. Brodski motor s reduktorom [22].....	9
Slika 10. Porivni elektrikomotor [23].....	9
Slika 11. Granične krivulje opterećenja četverotaktnog dizel motora [4].....	11
Slika 12. Presjek brodskog vijka [2].....	13
Slika 13. Radni princip mehaničkog regulatora [8].....	15
Slika 14. Hidromehanički regulator s droop polugom [7].....	16
Slika 15. Hidromehanički regulator električnog generatora pogonjenog dizel motorom [8]..	17
Slika 16. Shema sustava digitalnog upravljanja brzine vrtnje dizelskog motora [6] .....	18
Slika 17. Shema pick-upa i dijagram promjene induciranog magnetskog toka i napona [6]..	19
Slika 18. Blok dijagram PID kontrolnog zakona [19].....	20
Slika 19. Dijagram tlaka izgaranja goriva u ovisnosti o vremenu sa i bez VIT-a [20] .....	21
Slika 20. Grafički crtež zazora VIT-a [20] .....	23
Slika 21. Shema povezanosti pneumatskog cilindra s regulatorom [20].....	24
Slika 22. Common rail sustav ubrizgavanja [5] .....	26
Slika 23. Omjer Rail tlaka i brzine vrtnje motora [5].....	27
Slika 24. Shema regulacijskog mehanizma Wärtsilä 18V32 [18].....	29
Slika 25. Shema i postavke vratila regulatora [18].....	30
Slika 26. Shema elektropneumatskog uređaja za zaustavljanje prekoračenja brzine [18] .....	31
Slika 27. Common rail sustav tvrtke Wärtsilä [17] .....	32

## POPIS KRATICA

FPP (engl. *Fixed Pitch Propeller*)

VIT (engl. *Variable Injection Timing*)

VPP (engl. *Variable Pitch Propeller*)

WECS (engl. *Wärtsilä Engine Control System*)

brodski vijak s fiksnim krilima

promijenjivo vrijeme ubrizgavanja

brodski vijak s promjenjivim krilima

kontrolni sustav Wärtsilä motora