

# Praćenje rada sustava za izmjenu radnog medija brodskih motora

---

**Bota, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*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:164:461986>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-31**

*Repository / Repozitorij:*

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



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**IVAN BOTA**

**PRAĆENJE RADA SUSTAVA ZA IZMJENU  
RADNOG MEDIJA BRODSKIH MOTORA**

**ZAVRŠNI RAD**

**SPLIT, 2018.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**STUDIJ: BRODOSTROJARSTVO**

**PRAĆENJE RADA SUSTAVA ZA IZMJENU  
RADNOG MEDIJA BRODSKIH MOTORA**

**ZAVRŠNI RAD**

**MENTOR:**

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

**STUDENT:**

**Ivan Bota  
(MB:0023063502)**

**SPLIT, 2018.**

## SAŽETAK

Ovaj završni rad opisuje proces izmjene radnog medija brodskih motora s unutarnjim izgaranjem.

Prvi dio rada donosi teoretski opis izmjene radnog medija po taktovima kako četverotaktnog tako i dvotaktnog motora. U nastavku završnog rada su spomenuti sustavi ispiranja dvotaktnih motora, a od kojih je pobliže opisan samo istosmjerni sustav ispiranja. Također je izmjena radnog medija prikazana i upotrebom razvodnih dijagrama za četverotaktni i dvotaktni motor. Iduća dva poglavlja donose opis pojedinačnog kretanja zraka kroz sustav usisa odnosno ispušnih plinova procesa izgaranja kroz sustav ispuha. U posljednjem poglavlju se nalazi tablica koja sadrži primjer rasporeda održavanja brodskog motora sa popisom radnih naloga podijeljenih na brodske sustave koji se moraju pravovremeno izvršavati.

**Ključne riječi:** *Izmjena radnog medija, brodski motor, usis, ispuh, raspored održavanja*

## ABSTRACT

This work describes the exchange of working fluid in the marine engine with internal combustion. The first part of the work gives a theoretical description of exchange working fluid for four-stroke and two-stroke engines. In the continuation of the work, two-stroke engine scavenge systems are mentioned, of which only the uniflow scavenge system is described. Also, exchange of the working fluid is shown by using timing diagram of four-stroke and two-stroke engine. The next two chapters provide a description of the individual movement of the air through the intake system and the exhaust gases of combustion process through the exhaust system. In the last chapter, there is a table that contains an example of a marine engine maintenance schedule with a list of workorders subdivided into ship system that must be timely executed.

**Keywords:** *Exchange of working fluid, marine engine, intake, exhaust, maintenance schedule*

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>6</b>
<b>2. SUSTAV IZMJENE RADNOG MEDIJA BRODSKIH MOTORA</b> ...	<b>7</b>
<b>2.1. OPĆENITO O BRODSKIM MOTORIMA</b> .....	<b>7</b>
2.1.1. Načelo rada dizelskih motora .....	8
<b>2.2. IZMJENA RADNE TVARI KOD ČETVEROTAKTNIH MOTORA</b> .....	<b>9</b>
2.2.1. Prvi takt - usis .....	10
2.2.2. Drugi takt - kompresija .....	11
2.2.3. Treći takt – izgaranje i ekspanzija (radni takt) .....	12
2.2.4. Četvrti takt – ispuh .....	13
2.2.5. Faze izmjene radnog medija u četverotaktnim dizelskim motorima.....	14
<b>2.3. IZMJENA RADNE TVARI KOD DVOTAKTNIH MOTORA</b> .....	<b>15</b>
2.3.1. Takt kompresije i radni takt.....	19
<b>2.4. SUSTAVI ISPIRANJA DVOTAKTNIH MOTORA</b> .....	<b>20</b>
2.4.1. Istosmjerni sustav ispiranja .....	21
<b>2.5. RAZVODNI DIJAGRAM</b> .....	<b>23</b>
2.5.1. Razvodni dijagram četverotaktnog motora .....	23
2.5.2. Razvodni dijagram dvotaktnog motora.....	24
<b>3. SUSTAV USISA ZRAKA</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1. FILTRI</b> .....	<b>26</b>
3.1.1. Standardni filtri zraka.....	26
3.1.2. Filtri zraka za teške uvjete rada .....	26
<b>3.2. RASHLADNIK ISPIRNOG ZRAKA</b> .....	<b>27</b>
<b>3.3. SEPARATOR KAPLJICA</b> .....	<b>27</b>
<b>3.4. USISNI KANALI KOD DVOTAKTNIH SPOROKRETNI MOTORA</b> .....	<b>28</b>
3.4.1. Mjereni parametri usisa kod četverotaktnih brzokretnih motora.....	29
<b>4. SUSTAV ISPUHA ISPUŠNIH PLINOVA</b> .....	<b>30</b>
<b>4.1. ISPUŠNI VENTIL KOD DVOTAKTNIH SPOROKRETNIH MOTORA</b> ..	<b>30</b>
4.1.1. Mjereni parametri ispuha kod četverotaktnih brzokretnih motora.....	32
<b>4.2. METODE SMANJIVANJA EMISIJE ISPUŠNIH PLINOVA</b> .....	<b>32</b>
4.2.1. Primarne metode.....	33
4.2.2. Sekundarne metode .....	35

4.3. TURBOPUHALO .....	36
<b>5. RASPORED ODRŽAVANJA BRODSKOG ČETVEROTAKTNOG BRZOKRETNOG CATERPILLAR-MAK M32 MOTORA .....</b>	<b>39</b>
5.1. TURBOPUHALO .....	41
<b>6. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>42</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>43</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>45</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>46</b>
<b>POPIS KRATICA .....</b>	<b>47</b>

## 1. UVOD

Na proces izmjene radnog medija motora utječu mnogi parametri kao i konstrukcijska izvedba samog motora. Procesu izmjene radnog medija posvećivalo se mnogo pažnje još prije pedesetak godina, tako da to nije jedan od novijih trendova, ali je trend čijem se razvoju i danas posvećuje pažnja.

Kako bi se osigurao normalan rad motora potrebno je osigurati za svaki novi radni proces novu količinu zraka i goriva, te odvođenje ispušnih plinova nastalih u prethodnom procesu. Kod dizelskih motora se gorivo uštrcava u stlačeni zrak. Odvođenje ispušnih plinova razlikuje se u dvotaktnim i četverotaktnim motorima, ali i u motorima s nabijanjem ili bez njega [1].

Zadaci izmjene radnoga medija su sljedeći [3]:

- izbaciti iz cilindra produkte izgaranja iz ranijega procesa
- dovesti potrebnu masu svježega radnog medija
- da bi motor razvio veću snagu potrebno je dovesti čim više radnoga medija
- spriječiti gubitak dovedenoga svježeg radnog medija u ispušni vod
- organizirati početno strujanje u cilindru
- pri izmjeni radnoga medija potrošiti čim manje energije.

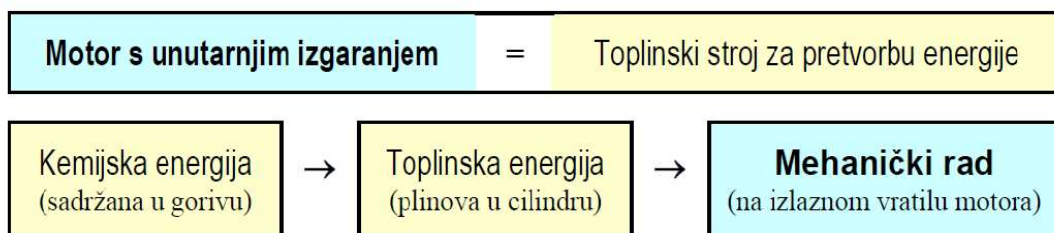
## 2. SUSTAV IZMJENE RADNOG MEDIJA BRODSKIH MOTORA

### 2.1. OPĆENITO O BRODSKIM MOTORIMA

Motor je stroj koja služi za pretvaranje određenih vrsta energije u mehaničku energiju gibanja. Tako je motor stroj koja pretvara [9]:

- kemijsku energiju goriva u toplinsku energiju, a toplinsku energiju (energiju izgaranja) u energiju gibanja

Prikažemo li to pomoću blok dijagrama onda to izgleda ovako [2]:

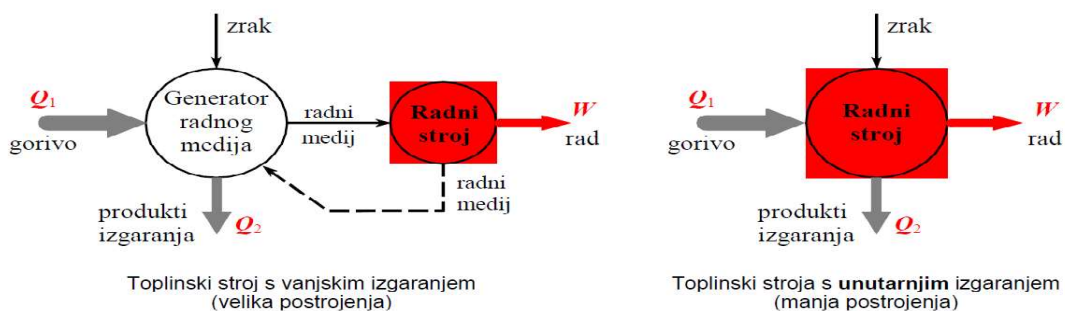


Slika 1. Definicija motora s unutarnjim izgaranjem

Stupanj korisnog djelovanja (stupanj korisnosti) jednak je omjeru proizvedenog (odvedenog) rada  $W$  i stroju dovedene topline  $Q_1$ :

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \quad (1)$$

Shematski prikaz toplinskog stroja s vanjskim i unutarnjim izgaranjem:



Slika 2. Shematski prikaz toplinskog stroja [2]

Načini, mogućnosti i želje za upotrebu energije na brodu određene su nizom posebnosti koje se razlikuju od onih pri stacionarnim uređajima [1]:



- prilagodba radu pri brzim promjenama režima rada i postojanje režima prekreta, odnosno uređaja za promjenu smjera plovidbe
- ograničenost masa i gabarita uređaja
- prilagođenost trajnom pouzdanom radu u uvjetima autonomne plovidbe broda, daleko od mjesta dijelovima i obavljanja remonta
- prilagođenost radu u uvjetima ljuljanja, naginjanja i poniranja broda.

Osim gore navedenih posebnosti, brodski porivni sustavi također moraju odgovarati zahtjevima karakterističnima za bilo koji suvremeni tehnički kompleks. Među njima i tome da tehničko – ekonomska efikasnost broskog porivnog sustava mora odgovarati razini razvoja suvremene tehnike, što se u osnovi određuje njegovim ekonomskim (efektivnim) stupnjem iskoristivosti. Neprestana nastojanja za povećanjem stupnja iskoristivosti uvjetovana su znatnim energetske gubicima pri pretvorbi i prijenosu topline.

Važni eksploatacijski zahtjev je sigurnost broskog porivnog sustava pod kojim se podrazumijeva pouzdanost rada porivnog motora o kojem ovisi sigurnost broda u cjelini.

### **2.1.1. Načelo rada dizelskih motora**

Dizelski motori su strojevi koji pretvaraju toplinsku energiju, dobivenu izgaranjem goriva, u mehanički rad. Proces se ponavlja ciklički, a odvija se u cilindru motora zbog čega se nazivaju motori s unutarnjim izgaranjem. Izgaranje se događa pri uštrcavanju goriva u komprimirani i zagrijani zrak te dolazi do samozapaljenja goriva za vrijeme miješanja sa zrakom. Uslijed naglog izgaranja goriva, naglo se povećava tlak i temperatura plinova koji djeluju na klip ili stap silom koja se prenosi preko stapnog mehanizma na koljenasto vratilo, koje se kružno giba.

Podjela prema realizaciji radnog procesa na [4]:

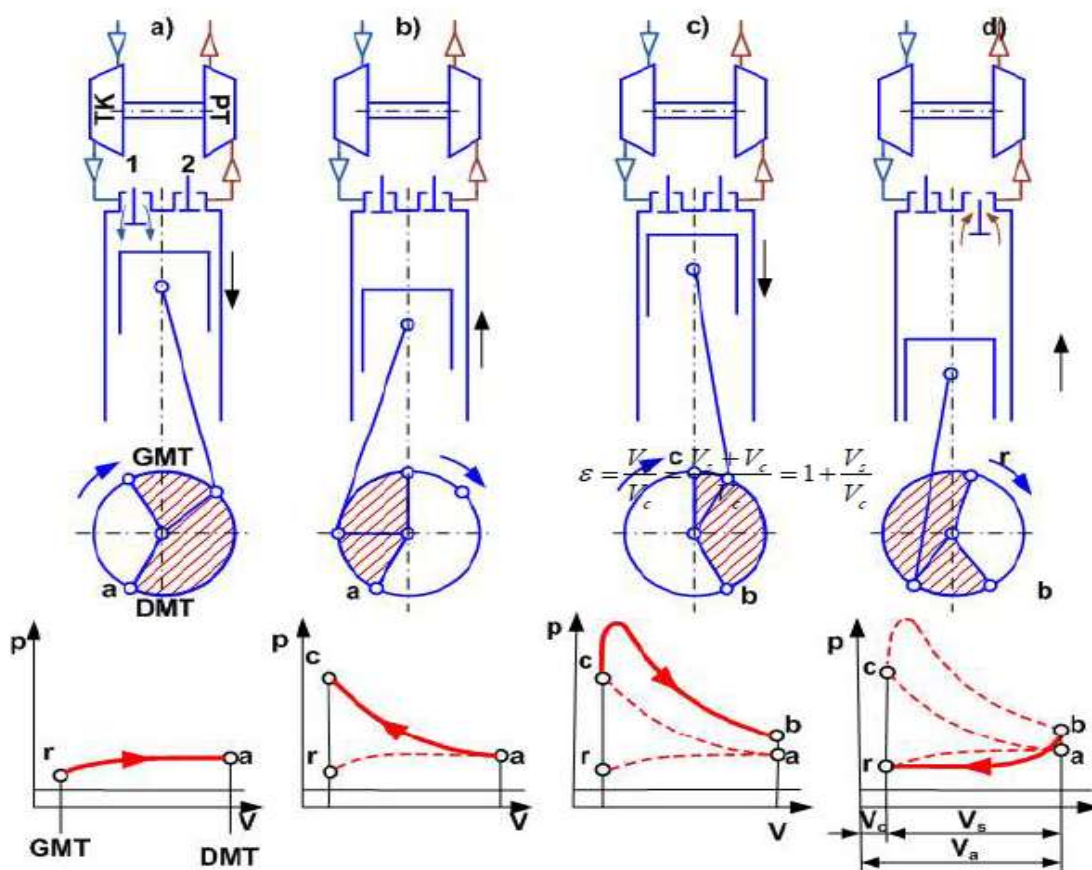
- Četverotaktne motore (4T) u kojima se radni proces odvija u 4 takta, odnosno u dva okretaja koljenastog vratila.
- Dvotaktne motore (2T) u kojima se proces odvija u dva takta, odnosno za jedan okretaj koljenastog vratila.

## 2.2. IZMJENA RADNE TVARI KOD ČETVEROTAKTNIH MOTORA

Kod četverotaktnog motora ciklus potreban za jedan radni proces obavlja se za vrijeme dva cijela okretaja koljenastog vratila, odnosno za četiri hoda klipa ili četiri takta.

Radni proces četverotaktnih motora odvija se u četiri hoda klipa ili četiri takta kako slijedi [4]:

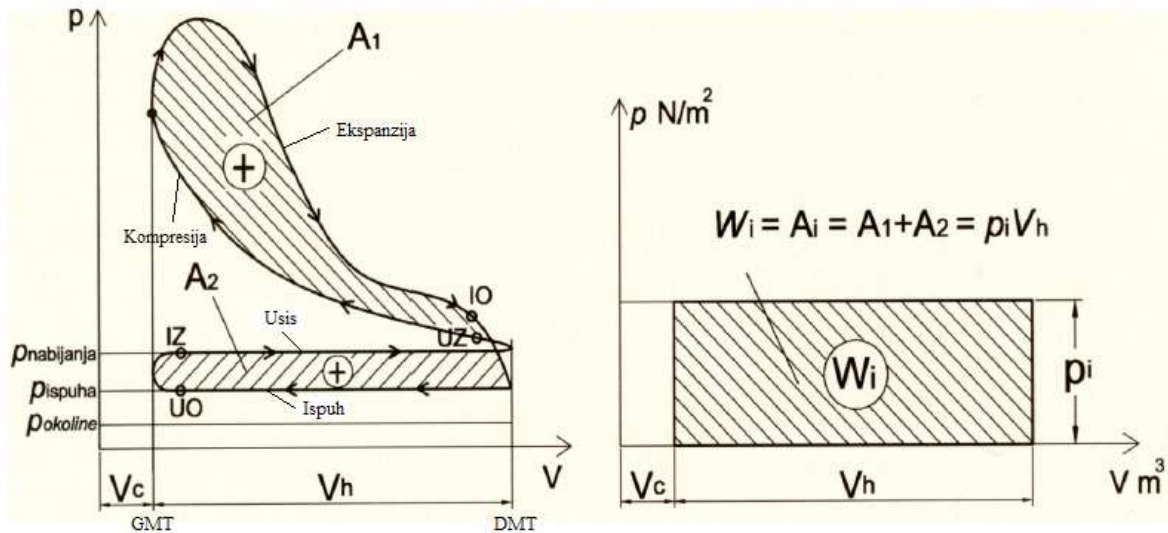
- usisavanje zraka (a) – izmjena radnog medija
- kompresija, uštrcavanje goriva i paljenje (b) – proizvodnja rada
- izgaranje i ekspanzija (c) – proizvodnja rada
- ispuh plinova (d) – izmjena radnog medija.



Slika 3. Proces četverotaktnog motora [4]

Na kraju svakog radnog procesa vrši se izmjena radne tvari u motoru, tj. produkti izgaranja izlaze iz cilindra, a u cilindar ulazi svježi zrak ili smjesa goriva i svježeg zraka.

Kod četverotaktnih motora frekvencija procesa u cilindru je jednaka polovici frekvencije koljenastog vratila. Zbog toga četverotaktni motor treba imati poseban razvodni mehanizam koji će raditi s polovicom frekvencije koljenastog vratila.



**Slika 4. Rad četverotaktnog motora s prednabijanjem u p – V dijagramu [28]**

Prosječni indicirani tlak radnog ciklusa  $p_i$  u  $[N/m^2]$  dobije se ako se površina  $A_i$  pretvori u pravokutnik s osnovicom  $V_h$  kako se to vidi na slici. Praktički se  $p_i$  dobije planimetriranjem površine  $A_i$  iz indikatorskog dijagrama i pretvaranjem te površine u pravokutnik s osnovicom  $V_h$  ili matematički pomoću integrala po zatvorenoj krivulji K:

$$W_i = \oint_K p dV_\alpha \quad (2)$$

gdje je:  $dV_\alpha$  promjena radnog volumena. [28]

Vrijednost indiciranog tlaka računamo primjenom sljedeće formule:

$$p_i = \frac{W_i}{V_h} \quad (3)$$

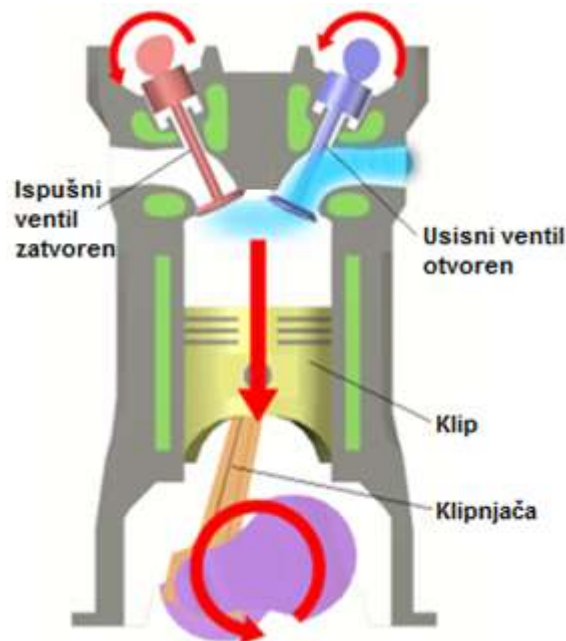
gdje su:

- $V_h$  osnovica pravokutnika
- $W_i$  indicirani tlak

### 2.2.1. Prvi takt - usis

Prvi takt započinje otvaranjem usisnog ventila  $10^\circ - 30^\circ$  prije GMT, a završava njegovim zatvaranjem  $40^\circ - 60^\circ$  poslije DMT.

Za vrijeme prvog hoda klipa od gornje mrtve točke (GMT) do donje mrtve točke (DMT) otvoren je usisni ventil i zrak ulazi u cilindar. Zbog otpora u dovodnim kanalima i usisnom ventilu tlak u cilindru niži je od atmosferskoga za od 0,05 do 0,1 [bar]. Da bi se cilindar što više napunio zrakom, usisni ventil se otvara nešto ispred GMT i zatvara nešto poslije DMT. Ispušni ventil je za vrijeme ovog hoda zatvoren. Temperatura u cilindru je približno 50 – 120 [°C] [5].



Slika 5. Prvi takt - usis [6]

### 2.2.2. Drugi takt - kompresija

Drugi takt započinje zatvaranjem usisnog ventila, 40° - 60° poslije DMT i traje sve do GMT.

Drugi hod klipa izvodi se radi komprimiranja usisnog zraka. Temperatura i tlak u cilindru rastu, a usisni i ispušni ventil su zatvoreni. Geometrijski stupanj kompresije  $\varepsilon$  određen je omjerom volumena cijelog prostora cilindra kada je klip u DMT prema volumenu kompresijskog prostora koji ostaje iznad klipa u GMT.

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_s + V_c}{V_c} = 1 + \frac{V_s}{V_c} \quad (4)$$

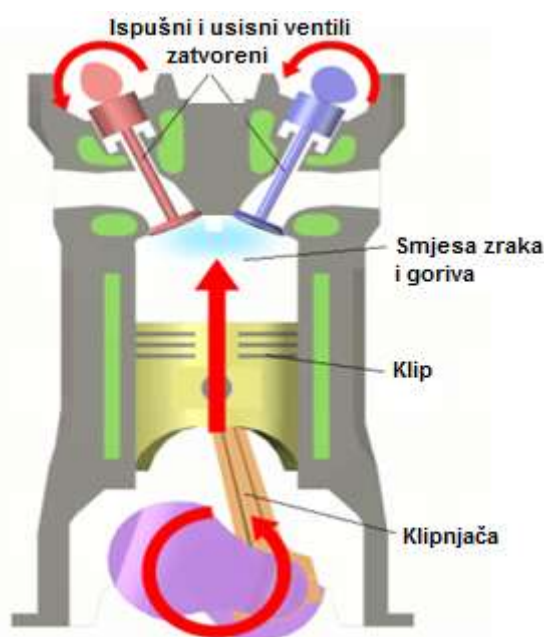
gdje su:

- $V_a$  kompresijski volumen [ $m^3$ ]
- $V_s$  volumen stapaja (hoda) od DMT do GMT [ $m^3$ ]
- $V_c$  ukupni volumen cilindra [ $m^3$ ]

$$V_c = V_a + V_s \text{ [m}^3\text{]} \quad (5)$$

Stupanj kompresije je kod dizel motora visok da bi se gorivo koje se ubrizgava neposredno prije GMT moglo u visoko zagrijanom zraku samozapaliti. Stupanj kompresije za dizel motore s nabijanjem iznosi preko 20.

Temperatura kompresije iznosi približno 400 – 500 [°C], a tlak kompresije iznosi od 10 do 20 [bar].

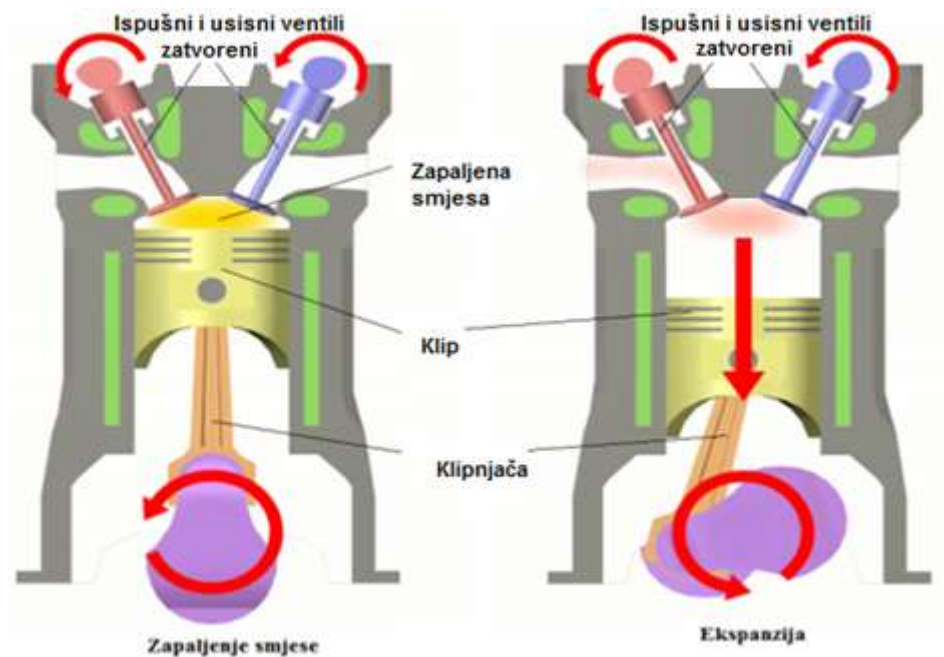


**Slika 6. Drugi takt - kompresija [7]**

### 2.2.3. Treći takt – izgaranje i ekspanzija (radni takt)

Nakon paljenja započinje faza izgaranja koja se produžuje i traje na putu klipa u trećem hodu na putu prema DMT. Radni takt završava 40° do 50° prije DMT. Nakon zapaljenja počinje izgaranje smjese zbog kojeg se temperatura poveća na 2000 do 2700 [°C], a tlak na 40 do 60 [bar]. [5]

Paljenje prije GMT potrebno je kako bi se dobilo više vremena za potpuno paljenje gorive smjese oko GMT. Usisni ventil je tijekom cijelog vremena takta zatvoren. Ispušni ventil se otvara nešto prije nego klip dođe u DMT da bi jedan dio plinova mogao s vlastitim tlakom izaći iz cilindra. Time se tlak do kraja hoda klipa snizi skoro na atmosferski, tako da klip u četvrtom taktu, pri istiskivanju, ima što manji protutlak.

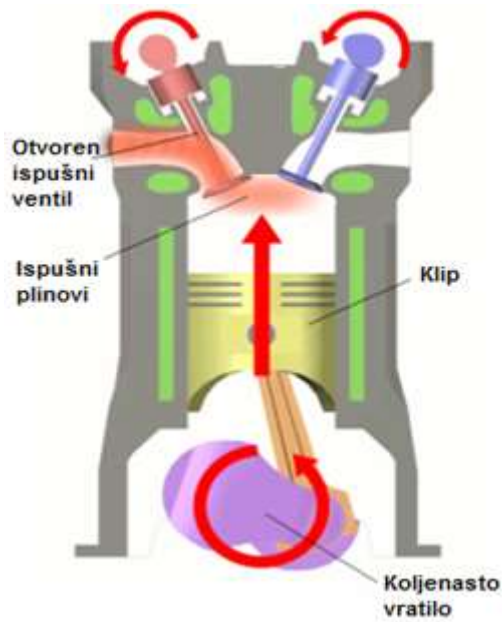


Slika 7. Treći takt – izgaranje i kompresija [5]

#### 2.2.4. Četvrti takt – ispuh

Četvrti takt započinje otvaranjem ispušnog ventila  $40^\circ$  do  $50^\circ$  prije DMT i završava njegovim zatvaranjem  $4^\circ$  do  $30^\circ$  poslije GMT.

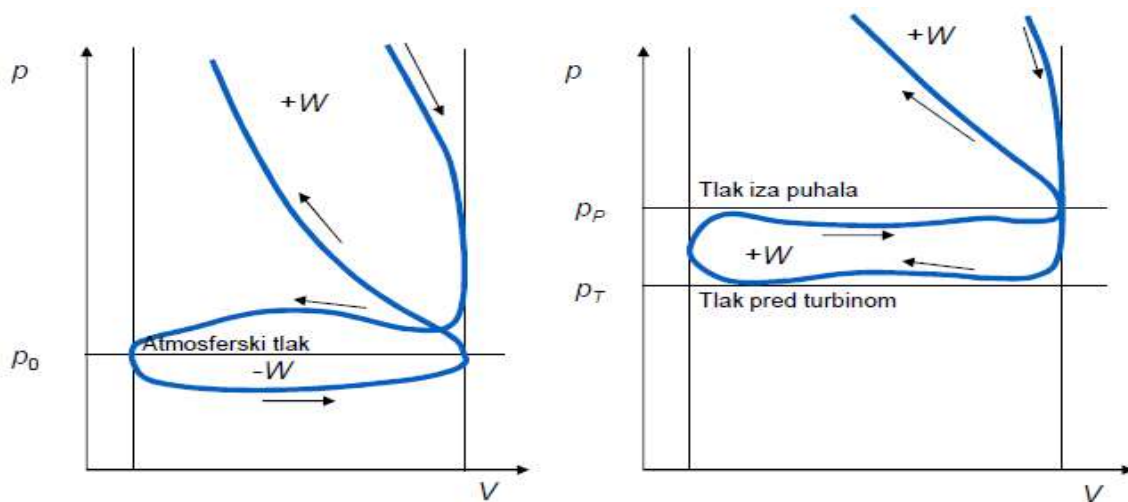
Četvrti takt služi za potpuno odstranjivanje plinova izgaranja iz cilindra. Tijekom hoda klipa od DMT do GMT ispušni ventil je otvoren, a klip istiskuje plinove izgaranja. Plinovi koji zaostaju u kompresijskom prostoru istiskuju se nadirućim svježim zrakom, jer ispušni ventil ostaje još neko vrijeme otvoren, a kad se usisni već otvora. To se naziva prekrivanje otvaranja usisnog i ispušnog ventila i može iznositi do  $135^\circ$  zakreta koljenastog vratila. Prekrivanjem se iskorištava inercija plinova. Plinovi koji prolaze kroz ispušni ventil još ekspandiraju i ulaze u ispušni vod s tlakom od 1,05 do 1,10 [bar] i s temperaturom od 250 do 500 [°C].



Slika 8. Četvrti takt – ispuh [5]

### 2.2.5. Faze izmjene radnog medija u četverotaktnim dizelskim motorima

Razlikujemo izmjenu radnog medija kod motora sa slobodnim usisom i kod motora sa prednabijanjem. Rad izmjene radnog medija je kod motora sa slobodnim usisom negativan, dok je kod motora sa prednabijanjem rad pozitivan.



Slika 9. Proces izmjene radnog medija kod četverotaktnih motora sa slobodnim usisom i kod motora s prednabijanjem [3]

U tablici su dane faze izmjene radnog medija karakteristične za četverotaktne dizelske motore.

Optimalne faze izmjene radnog medija biraju se iz uvjeta najekonomičnijeg rada motora u eksploataciji.

**Tablica 1. Faze izmjene radnog medija u četverotaktnim dizel motora u stupnjevima okreta koljenastog vratila [4]**

D M	Ispušni ventil		Usisni ventil		Prekrivanje ventila
	Otvaranje prije GMT	Zatvaranje iza GMT	Otvaranje do GMT	Zatvaranje iza GMT	
Bez nabijanja	20-50	15-25	15-20	20-50	30-40
Sa nabijanjem	40-50	50-60	50-80	40-50	100-140

Broj ventila u poklopcu cilindra i njihovi konstrukcijski odnosi i otvori moraju osigurati ispuh plinova i punjenje cilindra zrakom uz najmanje otpore strujanju i potrebnu čvrstoću poklopcu cilindra i ventila.

Četverotaktni motori mogu imati dva ili četiri ventila u poklopcu cilindra. [1]

### 2.3. IZMJENA RADNE TVARI KOD DVOTAKTNIH MOTORA

Izmjena radnoga medija kod dvotaktnog se motora naziva ispiranjem cilindra, a podrazumijeva istovremeno pražnjenje cilindra od ispušnih plinova i punjenje svježim radnim medijem. Za vrijeme istovremene otvorenosti ispušnih i usisnih kanala/ventila, svježe punjenje istiskuje ispušne plinove iz cilindra.

Dvotaktni motor se bitno razlikuje od četverotaktnog po izmjeni radne tvari u cilindru. Kod četverotaktnog motora jedan radni proces traje četiri takta, odnosno dva okreta koljenastog vratila. Od ta četiri takta, dva su "beskorisna" za proizvodnju rada, odnosno jedan okret koljenastog vratila je u tom smislu "beskoristan". Također dvotaktni motor je po svojim konstrukcijskim obilježjima mnogo jednostavniji od četverotaktnog motora. Neki dijelovi koji su neophodni za rad četverotaktnog motora, kod dvotaktnog ne postoje. Primjer su usisni ventili, a kod velike većine jednostavnih dvotaktnih motora nema ni ispušnih ventila, koji su kod dvotaktnih motora zamijenjeni sa kanalima na košuljici kroz koje se vrši

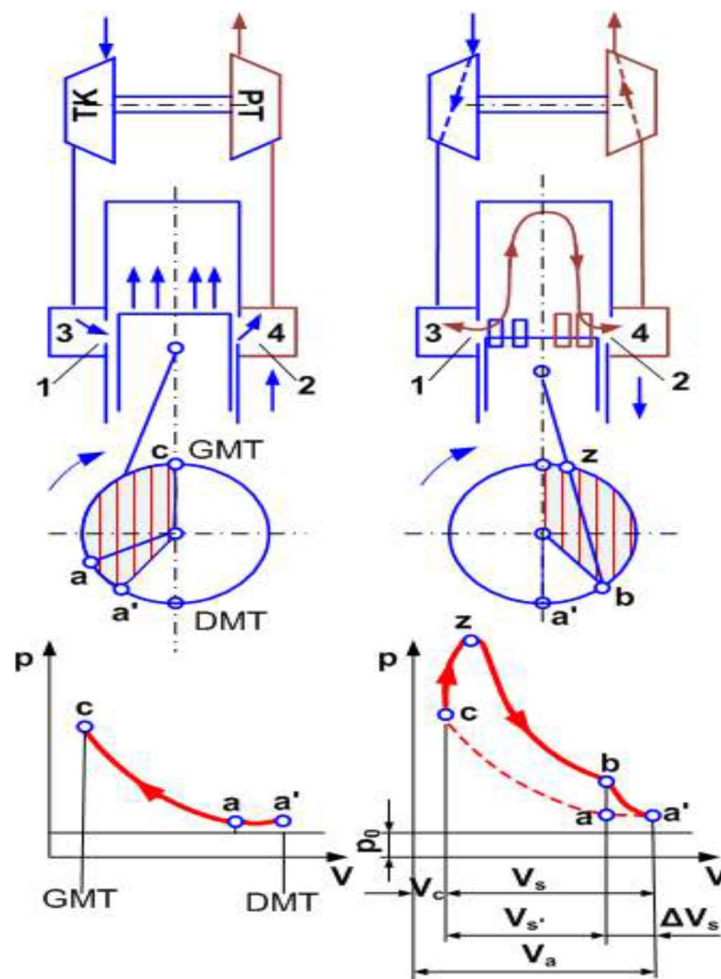


izmjena radnog medija. Iz toga proizlazi da kod dvotaktnog motora imamo usisne kanale, a kod motora bez ventila i ispušne kanale.

U dvotaktnim motorima proces ispiranja i nabijanja cilindra zrakom obavlja se za samo  $120^\circ$  do  $150^\circ$  okreta koljenastog vratila, i to u dijelu hoda ekspanzije i dijelu hoda kompresije. Znatni dio procesa odvoda ispušnih plinova odvija se istodobno s procesom dovoda svježeg zraka. Pri tome se neizbježno miješaju dijelovi ispušnih plinova i svježeg zraka.

Zbog jednostavnije analize karakteristike izmjene radnog medija, taj se proces dijeli na četiri dijela [1]:

- slobodni ispuh
- prisilni ispuh
- ispiranje
- nabijanje.

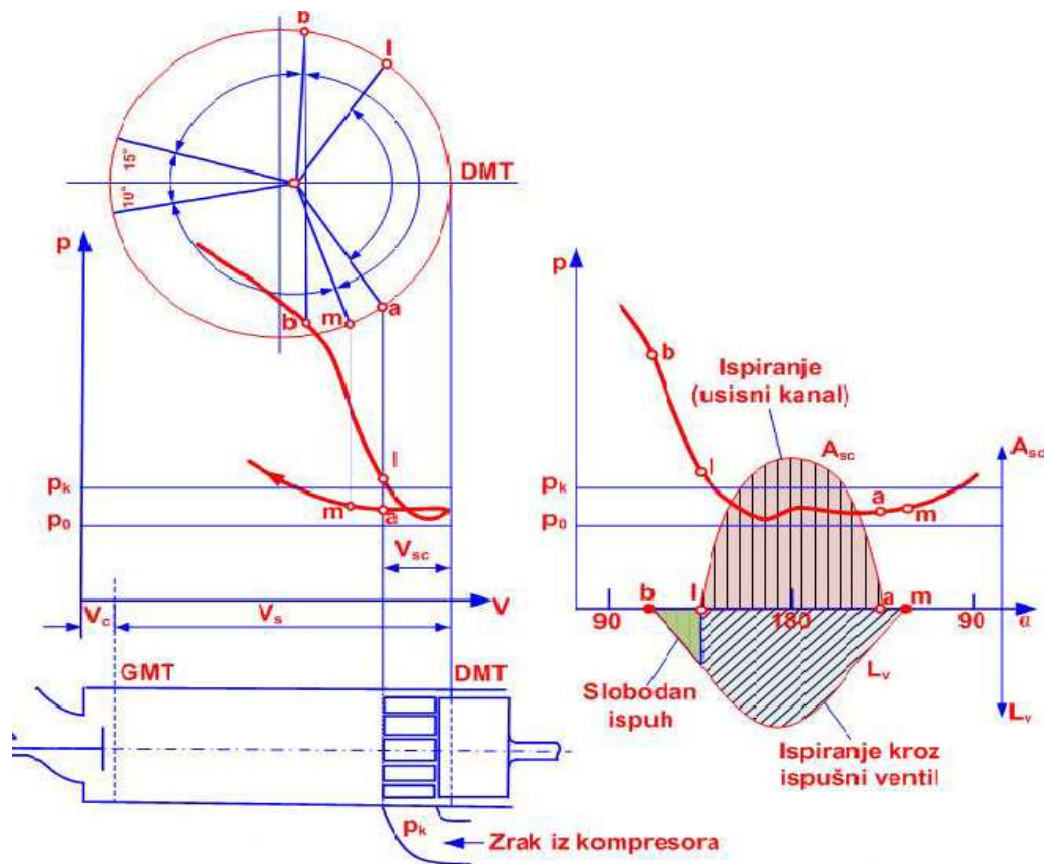


Slika 10. Proces dvotaktnog motora [4]

Slobodni ispuh započinje od trenutka otvaranja ispušnih kanala do početka ispiranja. Ovisno o karakteru strujanja plinova kroz ispušne raspore ili ispušne ventile, proces ispuha se dijeli na nadkritični i podkritični. Prisljni ispuh obuhvaća period od početka ulaska zraka u cilindar do zatvaranje usisnih kanala.

Radni proces dvotaktnih motora događa se u dva hoda stapa (klipa) ili dva takta [4]:

- takt kompresije
- radni takt.



Slika 11. Izmjena radnog medija dvotaktnog motora [4]

Ovim dijagramom se prikazuju površine slobodnog ispuha i prisilnog ispiranja usisnim zrakom te odnos količina usisnog zraka i ispušnog zraka.

Takt kompresije [4]:

- ispiranje – nabijanje
- kompresija
- uštrcavanje goriva
- zapaljenje.

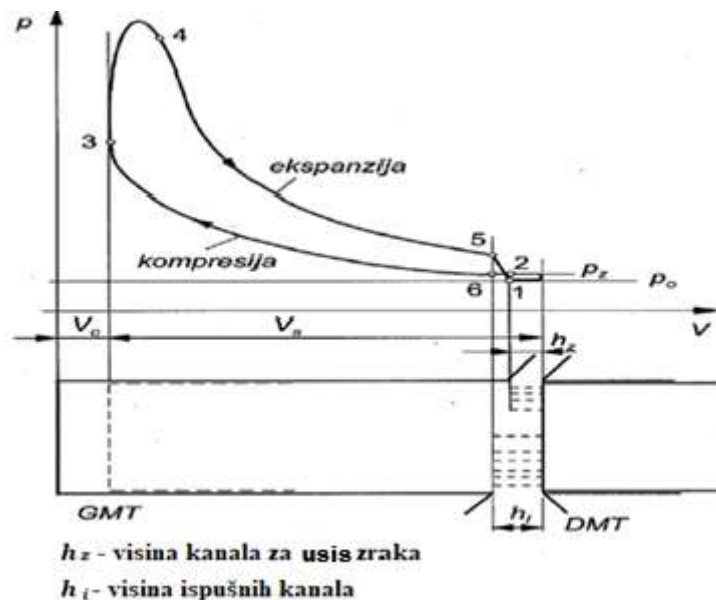
Radni takt [4]:

- izgaranje
- ekspanzija
- ispuh
- početak ispiranja.

Kod dvotaktnih motora frekvencija procesa u cilindru je jednaka frekvenciji koljenastog vratila, pa klip može služiti kao razvodni mehanizam.

Zbog dva puta veće frekvencije procesa u cilindru, snaga dvotaktnog motora je veća od četverotaktnog (ali ne dvostruko nego približno do 60%), a za istu snagu on je manji i laganiji (ako nema ventile), međutim toplinsko opterećenje mu je veće. Konstrukcija dvotaktnog motora je drugačija: dvotaktni motor mora za punjenje cilindra imati kompresor jer je tlak u cilindru tijekom cijelog ulaska radne tvari veći od tlaka okoline  $p_0$ . Konstrukcija može biti vrlo jednostavna, ako se razvod vrši samo s pomoću klipa i kanala jer nije potreban poseban razvodni mehanizam.

Ispiranje cilindra od zaostalih ispušnih plinova od prethodnog procesa je dobro samo kod izvedbe s uzdužnim (istosmjernim) ispiranjem [2].



Slika 12. Rad dvotaktnog motora u p-V dijagramu [9]

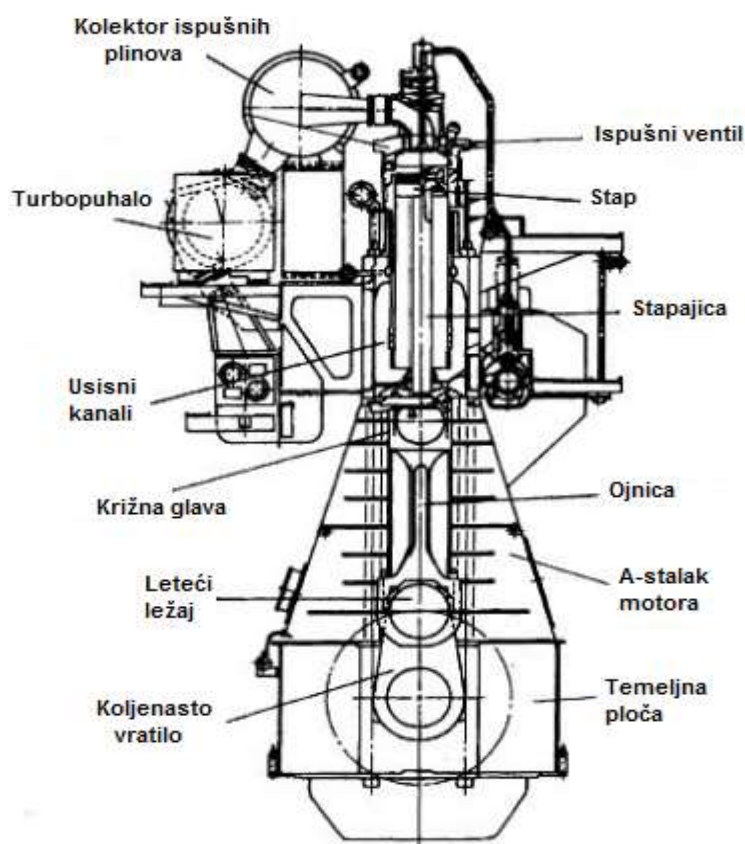
Zrak koji je ispunio cilindar, komprimira se od točke 6 do točke 3. Od točke 3 do 4 traje proces izgaranja gdje se dovodi toplina  $Q_{dov}$ . Od točke 4 do 5 plinovi izgaranja

ekspandiraju. U točki 5 klip prvo otvara ispušne kanale te tlak pada na atmosferski, a tek kada klip dođe u položaj 1 otvara usisne kanale, koji su niži, tlak se malo povećava. U točki 2, kada klip opet prekrije usisne kanale, tlak se skoro izjednači s atmosferskim, jer su ispušni kanali još otvoreni. Kompresija započinje u točki 6, nakon zatvaranja ispušnih kanala i traje do točke 3.

Ispiranje plinova izgaranja i punjenje svježim zrakom odvija se djelomično u taktu kompresije, a djelomično u radnom taktu. Kompresija, paljenje, izgaranje i ekspanzija odvijaju se jednako kao i kod četverotaktnog motora, dok za ispiranje ostaje samo vrijeme na kraju drugog i na početku prvog takta.

### 2.3.1. Takt kompresije i radni takt

Kretanjem klipa od DMT prema GMT započinje takt kompresije. Nakon što je zatvoren ispušni ventil, gibanjem klipa prema GMT klip prekriva usisne kanale te prestaje dotok svježeg zraka i počinje komprimiranje zraka.



Slika 13. Dvotaktni dizel motor [31]

Daljnijim kretanjem klipa prema GMT u cilindru dolazi do smanjenja volumena te povećanja tlaka i temperature. Kada klip stigne do GMT započinje radni takt. Međutim, ubrizgavanje goriva započinje nekoliko stupnjeva prije GMT.

Ubrizgavanjem goriva u cilindar, ono se samozapaljuje zbog visoke temperature komprimiranog zraka i fino raspršene maglice goriva. Gorivo se ubrizgava pod tlakom od 150 [bar]. Nakon ekspanzije stap kreće prema DMT i okreće koljenasto vratilo na koje je spojen preko križne glave i ojnice. Ispuh počinje kada stap svojim gibanjem prema DMT otvori ispušne kanale na košuljici cilindra, koji su smješteni iznad usisnih kanala, tako da većina plinova izgaranja napusti prostor cilindra. Daljnijim kretanjem stapa prema DMT otvaraju se usisni kanali te svježiji zrak doprinosi što boljem ispiranju prostora cilindra. Dolaskom stapa u DMT završava se radni takt i ponovno započinje takt kompresije.

#### 2.4. SUSTAVI ISPIRANJA DVOTAKTNIH MOTORA

Najistaknutija karakteristika dvotaktnih motora, osim vrste procesa je svakako način ispiranja cilindra, tj. prostora izgaranja.

Pod pojmom ispiranja dvotaktnog motora podrazumijeva se ispuh plinova izgaranja u cilindru i punjenje prostora cilindra svježim zrakom pod tlakom. Vremenski interval za ovaj proces kod dvotaktnog motora je četiri puta manji nego kod četverotaktnih motora. Mjereno u stupnjevima otklona ručke koljenastog vratila interval ispiranja traje od oko 120° do 150°. Strujanje svježeg zraka također pridonosi hlađenju cilindra, klipova i ventila [12].

S obzirom na kratki vremenski interval za proces ispiranja maksimalni tlak ekspanzije kod dvotaktnih motora je nešto veći nego kod četverotaktnih motora, a geometrijski stupanj kompresije  $\varepsilon$  je nešto lošiji zbog zaostalih plinova izgaranja u prostoru izgaranja te se iz tog razloga kod dvotaktnih motora ne može postići dvostruko veća snaga.

Osnovni cilj ispiranja cilindra je da se zaostali plinovi izgaranja što bolje ispušu i da se što bolje pripremi cilindar za novo izgaranje.

Volumetrijska učinkovitost je mjera kvalitete dobave zraka motora. To je omjer stvarne količine svježeg zraka koji ulazi u cilindar i teoretske maksimalne količine svježeg zraka koja može ući u cilindar. Matematički oblik ove jednadžbe: [12]

$$\eta_{vol} = \frac{\text{stvarna uvedena masa zraka}}{\text{teoretski moguća masa zraka s obzirom na pomak}} \quad (6)$$

Zadovoljavajući proces ispiranja ovisi o [12]:

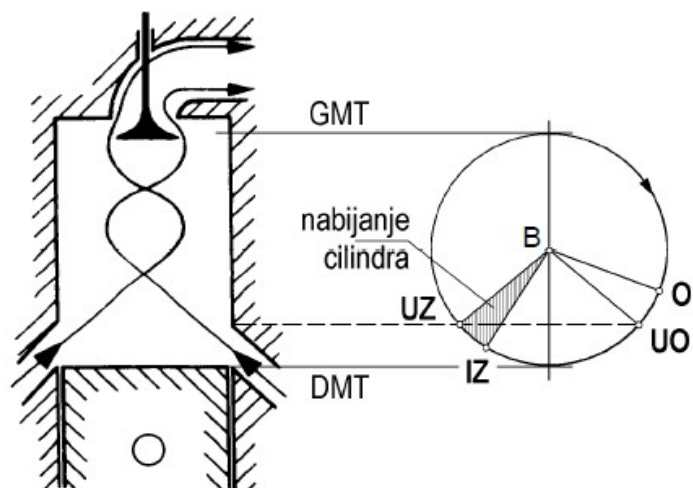
- efikasnosti uklanjanja ispušnih plinova
- otvorenim ispušnim kanalima ili ventilima prije usisnih kanala
- zatvorenim usisnim kanalima nakon izmjene radnog medija
- gubitku svježeg zraka kroz ispušne kanale svedenom na minimum.

Sustavi ispiranja cilindra od ispušnih plinova dijele se prema strujanju zraka kroz cilindar na [2]:

- s istosmjernim ili uzdužnim ispiranjem
- s poprečnim ispiranjem
- s obrnutim ili povratnim ispiranjem.

#### 2.4.1. Istosmjerni sustav ispiranja

Istosmjerno ispiranje cilindra karakteristično je po strujanju zraka uzduž osi cilindra kojim se istiskuju ispušni plinovi bez velikog miješanja sa njima. U brodskim dvotaktnim dizel motorima s istosmjernim ispiranjem postiže se najmanji koeficijent zaostalih plinova  $\gamma_r$  od 0,05 do 0,09.



Slika 14. Shema istosmjernog sustava ispiranja [2]

Sustav je izveden tako da su usisni kanali raspoređeni na donjem dijelu košuljice po cijelom obodu, a ispušni ventil je smješten u glavi cilindra. Svi se kanali nalaze na jednakim visinama te su jednakih oblika. Takav raspored kanala omogućuje ravnomjerno raspoređivanje zraka po presjeku cilindra. Tangencijalno usmjeren zrak na ulazu u cilindar osigurava njegovo strujanje kroz cilindar prema ispušnom ventilu po vijčanoj stazi. Takvo strujanje se zadržava do završetka kompresije, što poboljšava uspostavu kvalitetnije smjese zraka i goriva.

Pri gibanju klipa prema DMT otvaraju se prvo ispušni ventili. U periodu od otvaranja ispušnih do otvaranja usisnih kanala obavlja se slobodni ispuh. Istosmjerno ispiranje karakteristično je po relativno velikom kutu predotvaranja ispušnih ventila prije DMT, koji iznosi od  $86^\circ$  do  $95^\circ$  okreta koljenastog vratila. Dok su otvoreni usisni kanali, istodobno se odvija ispiranje cilindra i prisilni ispuh. Usisni kanali se zatvaraju od  $15^\circ$  do  $20^\circ$  iza zatvaranja ispušnih ventila zbog smanjenja gubitka punjenja. Oni se zatvaraju od  $47^\circ$  do  $57^\circ$  iza DMT.

Prednosti ovog sustava su [13]:

- visoki omjer stapaj/promjer stapa
- može se razviti veća snaga
- konstrukcija košuljice cilindra je jednostavnija zbog upotrebe ispušnog ventila, a ne ispušnih kanala
- visoki stupanj efikasnosti ovog sustava ispiranja u odnosu na ostale sustave
- veća efektivna duljina stapaja
- jednostavniji način brtvljenja sustava vode za hlađenje
- smanjeni broj i veličina kanala umanjuje problem podmazivanja košuljice, što smanjuje količinu potrošnje ulja.

Nedostaci ovog sustava su [13]:

- složenost konstrukcije
- potreban ispušni ventil što rezultira kao skuplje održavanje
- potrebna su dva ili više ubrizgača goriva.

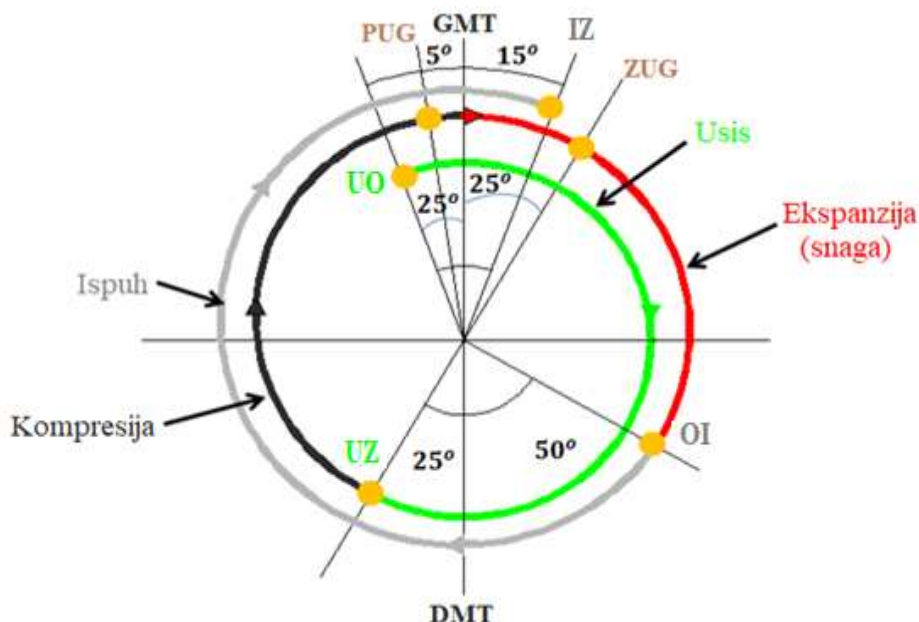
Istosmjerni sustav ispiranja s usisnim kanalom i ispušnim ventilom prvi su upotrijebili proizvođači motora Burmeister and Wain i Doxford, a u novije vrijeme MAN i Wartsila [1].

## 2.5. RAZVODNI DIJAGRAM

Razvodni dijagram pokazuje otvaranje i zatvaranje ventila u ovisnosti o položaju, odnosno hodu koljenastog vratila. S razvodnog dijagrama se može vidjeti prekrivanje ventila te kut otvaranja i zatvaranja ventila u odnosu na DMT i GMT. Kut otvaranja ventila i oblik brjegov razvodnog vratila eksperimentalno se utvrđuju za svaku konstrukciju motora kako bi se dobila maksimalna snaga za minimalnu potrošnju goriva. Kako se promjenom broja okretaja i opterećenjem motora mijenjaju optimalna vremena otvaranja i zatvaranja ventila, odabir je uvijek kompromisno rješenje. Kutovi otvaranja i zatvaranja ventila razlikuju se od motora do motora, tako da svaki motor ima svoj razvodni mehanizam. [8]

### 2.5.1. Razvodni dijagram četverotaktnog motora

Princip rada četverotaktnog motora može biti prikazan pomoću razvodnog dijagrama (Slika 16).



Slika 15. Razvodni dijagram četverotaktnog motora [10]

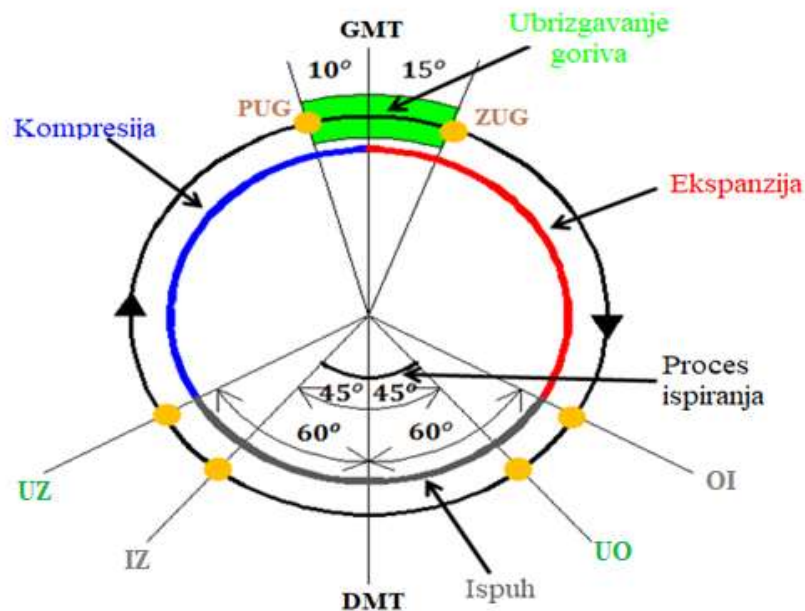
Promatrajući razvodni dijagram četverotaktnog motora zapažamo sljedeće [10]:



- UO: usisni ventil se otvara u rasponu od  $0^\circ$  do  $25^\circ$  prije GMT
- UZ: usisni ventil se zatvara u rasponu od  $30^\circ$  do  $70^\circ$  poslije DMT
- PUG: ubrizgavanje goriva započinje u rasponu od  $3^\circ$  do  $30^\circ$  prije GMT
- ZUG: ubrizgavanje goriva završava u rasponu od  $20^\circ$  do  $30^\circ$  poslije GMT
- OI: ispušni ventil se otvara u rasponu od  $40^\circ$  do  $50^\circ$  prije DMT
- IZ: ispušni ventil se zatvara u rasponu od  $5^\circ$  do  $30^\circ$  poslije GMT.

### 2.5.2. Razvodni dijagram dvotaktnog motora

Princip rada dvotaktnog motora može biti prikazan je pomoću razvodnog dijagrama (Slika 17).



Slika 16. Razvodni dijagram dvotaktnog motora [11]

Promatrajući razvodni dijagram dvotaktnog motora zapažamo sljedeće [11]:

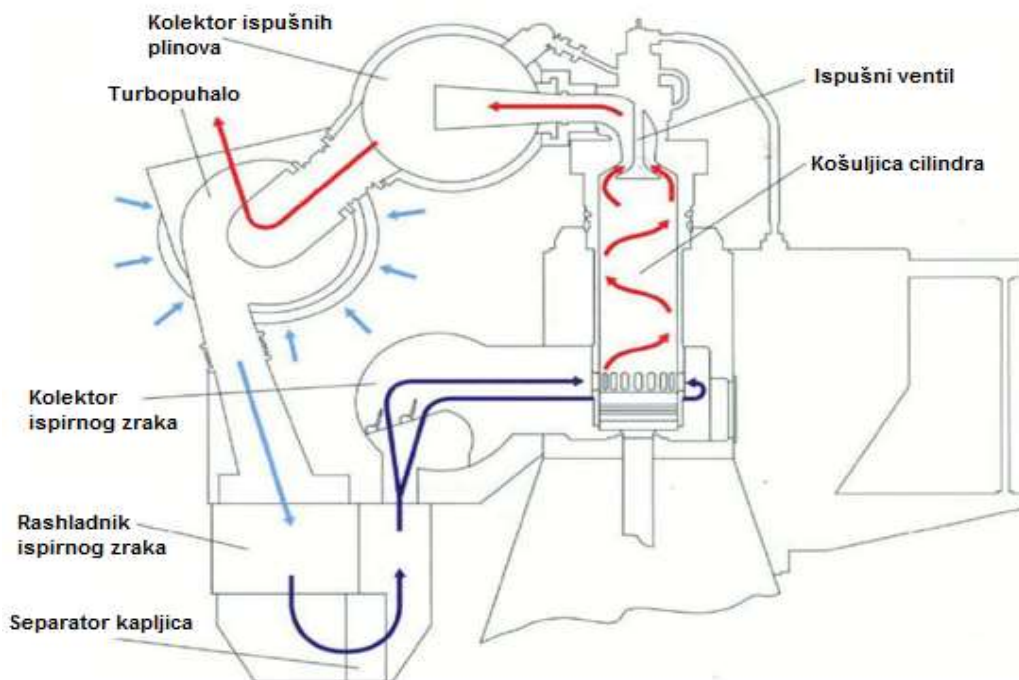
- IZ: zatvaranje ispušnih kanala i početak kompresije otprilike  $120^\circ$  prije GMT
- PUG: početak ubrizgavanja goriva otprilike  $10^\circ$  prije GMT
- ZUG: završetak ubrizgavanja goriva otprilike  $15^\circ$  nakon GMT
- OI: otvaraju se ispušni kanali otprilike  $120^\circ$  nakon GMT
- UO: otvaraju se usisni kanali otprilike  $45^\circ$  prije DMT
- UZ: zatvaraju se usisni kanali otprilike  $45^\circ$  poslije DMT.

### 3. SUSTAV USISA ZRAKA

U motorima se sustav dovoda svježeg zraka u cilindar naziva sustav usisa zraka. Iako je osnovna funkcija sustava usisa svježeg zraka unos zraka potrebnog za izgaranje kako bi se dobila maksimalna snaga, njegova je uloga također i pročišćavanje svježeg zraka te svojim strujanjem u motoru doprinijeti ispuhu plinova izgaranja.

Osnovni parametri usisnog zraka:

- volumen prostora izgaranja
- temperatura usisnog zraka
- tlak usisnog zraka.



**Slika 17. Prikaz kretanja ispirnog zraka kroz dvotaktni motor [14]**

Konstrukcija usisnog sustava ima direktni utjecaj na izlaznu snagu motora i emisiju ispušnih plinova.

Sustav usisa zraka sastoji se od [15]:

- filtra i cjevovoda
- turbopuhala
- rashladnika usisnog zrak

- separatora kapljica
- kolektora usisnog zraka i usisnih kanala.

### **3.1. FILTRI**

Nečistoće i abrazivne krhotine glavni su uzrok ubrzanog trošenja dijelova motoru. Upravo je usis zraka jedan od primarnih načina na koji nečistoće mogu ući u motor. Iz tog razloga, filtri su neophodni sastavni dijelovi sustava usisa motora te ih se mora redovito mijenjati.

Testiranjem trošenja motora je utvrđeno da čestice nečistoća manje od 1 [ $\mu\text{m}$ ] imaju mali utjecaj na životni vijek motora. Također je utvrđeno da će 99,5 % ove nečistoće napustiti prostor motora kroz sustav ispuha motora. Međutim, ulazak čestica nečistoća veličine od 1 do 10 [ $\mu\text{m}$ ] ima mjerljiv utjecaj na duljinu životnog vijeka motora te ga znatno skraćuje. [16]

Dobro dizajniran i osmišljen filter usisnog zraka je najučinkovitiji način sprječavanja ulaza nečistoća u prostor izgaranja. Mora biti sposoban odstraniti zauljeni zrak, hrđu i ostale nečistoće koje mogu prouzročiti nepravilnosti u radu te prekomjerno trošenje.

Vrste filtra [16]:

- standardni filtri zraka
- filtri zraka za teške uvjete rada.

#### **3.1.1. Standardni filtri zraka**

Standardni filter zraka na većini Caterpillar motora koristi visoko učinkoviti suhi papirni element pakiran u nisko ograničavajućem kućištu otpornom na vremenske neprilike.

Uklanjaju 99,5 % fine prašine te su također dizajnirani na način da smanje ulaz prašine prilikom njihove zamjene.

Neki novi modeli upotrebljavaju PowerCore filtre koji sadrže elemente od nano vlakana. Ovi filtri postižu pročišćavanje zraka uz manje ograničenje protoka zraka. [16]

#### **3.1.2. Filtri zraka za teške uvjete rada**

Filtri zraka za teške uvjete rada pružaju istu zaštitu kao i standardni filtri, ali imaju mogućnost produljenja vremenskog perioda rada filtra. U ovisnosti o protoku zraka kroz motor i vrsti filtra produljenje vremenskog perioda rada filtra može biti šest do sedam puta

dulje u odnosu na standardne filtre. S obzirom na poseban dizajn filtera zraka s dva elementa mogu također biti kategorizirani kao filtri zraka za teške uvjete rada. [16]

### **3.2. RASHLADNIK ISPIRNOG ZRAKA**

Prolaskom ispirnog zraka kroz kompresor dolazi do njegovog zagrijavanja za tri do četiri puta u odnosu na temperaturu okoline [17]. Kada je temperatura zraka povišena smanjuje se njegova gustoća što za rezultat ima smanjenje količine zraka u prostoru izgaranja. Količina zraka blizu stehiometrijskom omjeru ili manja uzrokuje nepotpuno izgaranje goriva. Iz tog se razloga između turbopuhala i ulaska ispirnog zraka u prostor izgaranja postavlja rashladnik zraka.

Rashladnici ispirnog zraka mogu biti prema konstrukciji:

- pločasti
- cjevasti.

Prednosti pločastog rashladnika u odnosu na cjevaste:

- manje dimenzije te masa rashladnika
- manje onečišćenje zbog turbulencije tijekom strujanja
- veličina se može mijenjati dodavanjem ili oduzimanjem ploča.

Nedostaci pločastoga rashladnika u odnosu na cjevaste:

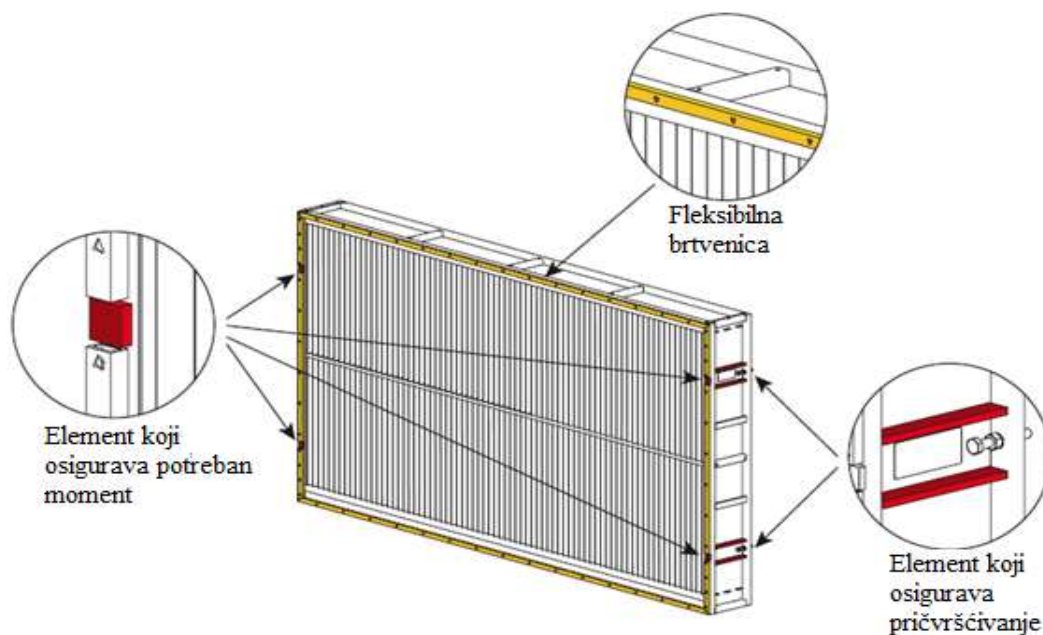
- veća cijena instalacije
- zbog brtvljenja između ploča ograničene su tlakom i temperaturom
- ne postoji mogućnost testiranja u svrhu otkrivanja mjesta propuštanja.

Rashladnik ispirnog zraka može biti hlađen rashladnim krugom morske vode ili danas isključivo nisko-temperaturnim krugom rashladne vode.

### **3.3. SEPARATOR KAPLJICA**

Prolaskom ispirnog zraka kroz rashladnik zraka zbog spuštanja njegove temperature dolazi do kondenzacije vlage iz zraka i nastanka kapljica vode. Kapljice vode bi ulaskom u prostor izgaranja imale negativan utjecaj na film cilindarskog ulja za podmazivanje košuljice

cilindra. Kako bi se to izbjeglo brodski motori opremljeni su sa separatorom kapljica. Separator kapljica je smješten između rashladnika ispirnog zraka i kolektora usisnog zraka. [18]



Slika 18. Separator kapljica [19]

#### 3.4. USISNI KANALI KOD DVOTAKTNIH SPOKRETNI MOTORA

Nakon separatora kapljica usisni zrak na optimalnom tlaku i temperaturi ulazi u usisni kolektor. Iz usisnog kolektora, prolaskom stapa preko usisnih kanala na putu prema DMT, ulazi u prostor izgaranja te vrši ispiranje zaostalih plinova izgaranja te nabija prostor izgaranja svježim zrakom za novo izgaranje. Usisni kanali su raspoređeni po donjem obodu košuljice cilindra.

Prilikom projektiranja broskog motora treba provesti prethodno eksperimentalna istraživanja na pokusnom motoru. Proizvođač motora pri izradi novog tipa motora mora uz pomoć ispitivanja i proračuna odrediti točan oblik i dimenzije usisnih kanala.

Proces za određivanje presjeka i položaja usisnih kanala može se podijeliti u nekoliko faza [21]:

- Temeljem iskustvenih podataka prethodno se odrede faze izmjene medija te promjenjivi presjeci ulaznih kanala.

- Zatim se pristupa proračunu kutnih presjeka potrebnih za izmjenu radnih medija u ovisnosti o tlaku i temperaturi početka i završetka slobodnog ispiranja, odnosno prisilnog ispiranja.
- Sljedeći korak je usporedba raspoloživih kutnih presjeka s neophodno potrebnima. Temeljem toga se donosi zaključak dali promjenjivi presjeci ulaznih kanala zadovoljavaju ili se pristupa daljnjem ispitivanju.

### 3.4.1. Mjereni parametri usisa kod četverotaktnih brzokretnih motora

Sljedeća tablica prikazuje tlak i temperaturu usisnog zraka četverotaktnog brzokretnog Caterpillar motora.

**Tablica 2. Izmjereni parametri promatranog Caterpillar motora [20]**

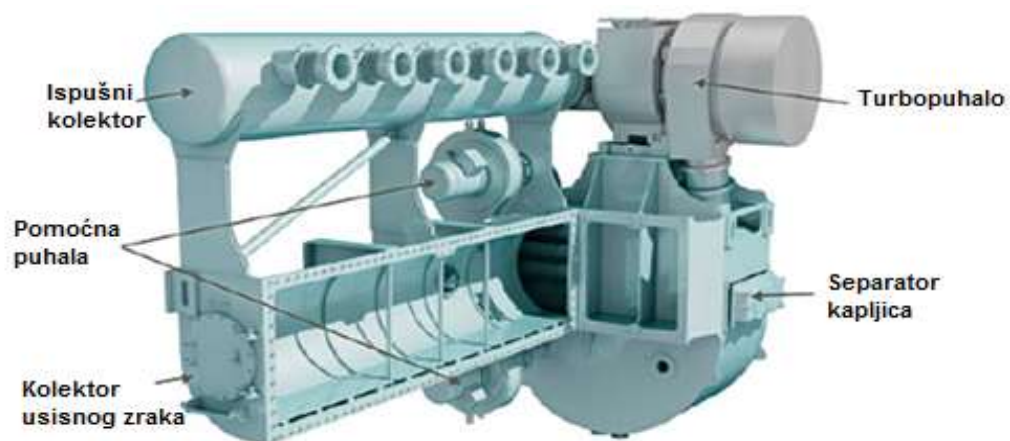
Mjereni parametar	Vrijednost	Mjerna jedinica
Temperatura usisnog zraka prije prolaska kroz rashladnik	147,35	°C
Temperatura usisnog zraka nakon prolaska kroz rashladnik	45,64	°C
Tlak usisnog zraka	1,1065	bar

## 4. SUSTAV ISPUHA ISPUŠNIH PLINOVA

Dijelovi zaduženi prvenstveno za odvod plinova izgaranja dalje od cilindra motora nazivaju se sustav ispuha. Ispušni sustav može biti dizajniran za obavljanje sljedećih funkcija: [22]

- prigušiti buku ispušnih plinova
- ugasiti iskre
- ukloniti abrazivne čestice iz plinova izgaranja
- opskrba toplinskom energijom turbine na ispušne plinove.

Prilikom pristupanja dizajniranju sustava ispuha prvo je važno odrediti koje od navedenih funkcija želimo da naš sustav obavlja.



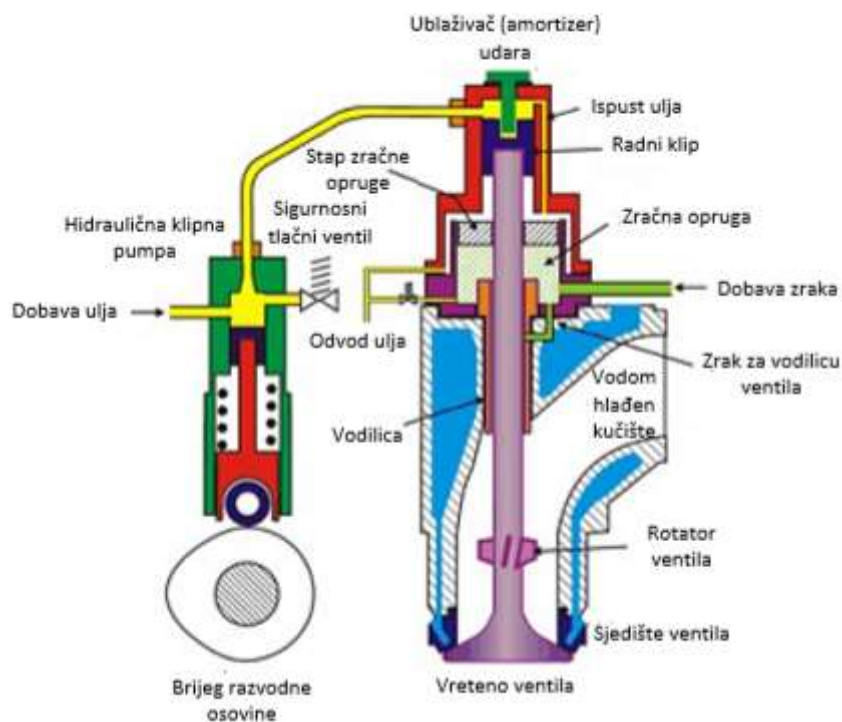
Slika 19. Sustav usisa i ispuha [29]

Prilikom dizajniranja sustava ispuha trebaju se također zadovoljiti sva pravila i regulative kojih je danas sve više. Prvenstveno se tu misli na zahtjeve i regulative IMO (International Maritime Organization) koja postavlja sve veće zahtjeve za smanjenje emisije CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> i NO<sub>x</sub> u ispušnim plinovima, a sve u svrhu zaštite okoliša. [23]

### 4.1. ISPUŠNI VENTIL KOD DVOTAKTNIH SPOROKRETNIH MOTORA

Ispušni ventil nalazi se u glavi cilindra te je zajedno s njom izložen maksimalnim tlakovima izgaranja i visokim temperaturama. Osim što moraju biti odgovarajuće pričvršćeni, moraju biti i adekvatno hladjeni.

Prostor izgaranja formiran je ili oblikovanjem glave cilindra ili krune stapa.



**Slika 20. Dijelovi ispušnog ventila [32]**

Osnovna funkcija ispušnog ventila je brtvljenje za vrijeme kompresijskog takta. Na taj način se osigurava maksimalan tlak izgaranja, odnosno maksimalna snaga motora. Ispušni ventil se podiže sa svog sjedišta u točno određenom trenutku za vrijeme takta ekspanzije u svrhu osiguravanja slobodnog ispuha i ispiranja cilindra od zaostalih plinova izgaranja ispirnim zrakom koji se dovodi za ponovnu kompresiju i izgaranje [32].

Suvremeni sporokretni dvotaktni motori s križnom glavom imaju hidraulički upravljane ispušne ventile koji se aktiviraju djelovanjem tlaka ulja hidrauličke pumpe koja je pogonjena razvodnom osovinom motora, a sila zatvaranja se ostvaruje pomoću zračne opruge [32]. Zahvaljujući dizajnu ostvareno je ujednačeno dinamičko ponašanje cijelog sustava ventila te dovoljno podizanje ventila za minimalni otpor protoka ispušnih plinova, a to rezultira izvrsnim performansama, pouzdanošću i većim životnim vijekom [32].



#### 4.1.1. Mjereni parametri ispuha kod četverotaktnih brzokretnih motora

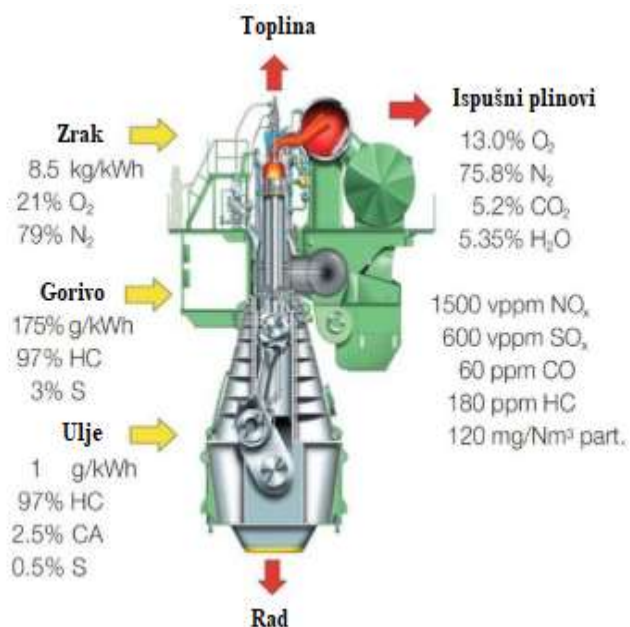
Sljedeća tablica prikazuje tlak i temperaturu ispušnih plinova četverotaktnog brzokretnog Caterpillar motora.

Tablica 3. Izmjereni parametri promatranog Caterpillar motora [20]

Mjereni parametar	Vrijednost	Mjerna jedinica
Temperatura ispušnih plinova nakon cilindra 1	373,53	°C
Temperatura ispušnih plinova prije turbopuhala	475,67	°C
Temperatura ispušnih plinova nakon turbopuhala	357,77	°C
Broj okretaja turbopuhala	18830	Rpm

#### 4.2. METODE SMANJIVANJA EMISIJE ISPUŠNIH PLINOVA

Ispušne emisije motora sa unutarnjim izgaranjem ovise o procesu izgaranja, korištenom gorivu, stanju motora i o mogućim sustavima za kontrolu ispušnih emisija ugrađenih na motoru.



Slika 21. Kompenzacija ispušnih emisija i ulaznih medija brodskog motora [25]

Metode smanjivanja emisije ispušnih plinova se koriste na brodovima radi smanjivanja emisije štetnih tvari kao što su: dušični oksidi, sumporni oksidi, čvrste čestice, ugljični monoksid, ugljični oksidi i štetne organske komponente. [23]

Metode koje se koriste mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine: [23]

- primarne metode
- sekundarne metode.

Pod primarne metode spadaju tehnička rješenja kojima se sprječava nastanak štetnih tvari u samome motoru, dok se sekundarnim metodama neutraliziraju već nastale štetne tvari. [23]

Primarnim metodama je moguće smanjiti emisiju dušičnih oksida za 10% do 50%, a sekundarnim čak i do 95%. [23]

Koncentracija  $\text{NO}_x$ -a u ispušnim plinovima ovisi o vršnim temperaturama izgaranja pa je za smanjenje emisije važno smanjiti vršne temperature izgaranja. Koncentracija  $\text{SO}_x$ -a u ispušnim plinovima ovisi isključivo o sadržaju sumpora u gorivu pa je u slučaju korištenja goriva s većim sadržajem sumpora neophodno naknadno obraditi ispušne plinova prije nego se ispuste u atmosferu.

#### 4.2.1. Primarne metode

##### **Preinake sustava izgaranja:**

- Jedna od najčešćih metoda podešavanja motora je povećanje omjera kompresije u kombinaciji s određenim vremenom ubrizgavanja. Zbog odgođenog vremena ubrizgavanja ne postižu se toliko visoke temperature kao kod standardnih motora te se taj motor nalazi pri visokim temperaturama kraće vrijeme što rezultira manjom emisijom  $\text{NO}_x$ -a. Međutim, povećani omjer kompresije povećava i potrošnju goriva kao rezultat odgođenog vremena ubrizgavanja. [23]
- Smanjenje emisije  $\text{NO}_x$ -a se kod sporokretnih dizel motora može postići korištenjem dvaju ili triju ubrizgavača goriva smještenih blizu vanjskog ruba prostora izgaranja. Svaki od tih ubrizgavača ima sapnicu s velikom brojem rupica za ubrizgavanje. Također, postoji optimalan broj rupica sapnice za minimum  $\text{NO}_x$ -a. [23]

### **Preinake sustava za dovod zraka**

- Smanjenjem temperature usisnog zraka smanjuje se temperatura izgaranja, a time i emisija NO<sub>x</sub>-a. Za svaka 3 [°C] smanjenja temperature usisnog zraka smanjuje se emisija NO<sub>x</sub>-a za 1%. [23]
- Povećanje tlaka usisnog zraka neće sam po sebi smanjiti emisiju NO<sub>x</sub>-a, pa se primarno koristi u kombinaciji s drugim metodama.

### **Izravno ubrizgavanje vode**

Smanjenje emisije NO<sub>x</sub>-a može se postići smanjenjem temperature tijekom procesa izgaranja, a to se postiže izravnim ubrizgavanjem vode u prostor izgaranja. Ovaj sustav zahtijeva samo čistu vodu i nekoliko dodatnih dijelova, a ostvaruje razne prednosti. Glavni dio tog sustava je ventil kroz koji se ubrizgava i voda i gorivo. Izravno ubrizgavanje vode smanjuje emisiju NO<sub>x</sub>-a za 50% - 60%, bez štetnog djelovanja na izlaznu snagu i dijelove motora. Tlak vode koja se ubrizgava iznosi od 210 do 400 [bar]. [23]

### **Recirkulacija ispušnih plinova**

Razlikujemo dvije varijante recirkulacije ispušnih plinova. Prva varijanta je recirkulacija ispušnih plinova prije turbopuhala, a druga poslije turbopuhala. Kod obje varijante plinovi se moraju ohladiti i pročistiti. Mana recirkulacije ispušnih plinova je otjecanje otpadnih voda koje se koriste za pročišćavanje plinova, a sadrže sumpor, neizgorene ugljikovodike, čađu i pepeo. Zbog toga nije pogodna za korištenje na brodu, već se koristi u postrojenjima na kopnu. [23]

### **Korištenje emulzije vode i goriva**

Utjecaj emulziranog goriva varira, ovisno o vrsti motora, ali u osnovi 1% vode smanjuje emisiju NO<sub>x</sub>-a za 1%. Kod teških brodskih goriva je moguća čista emulzija vode i goriva. [23]

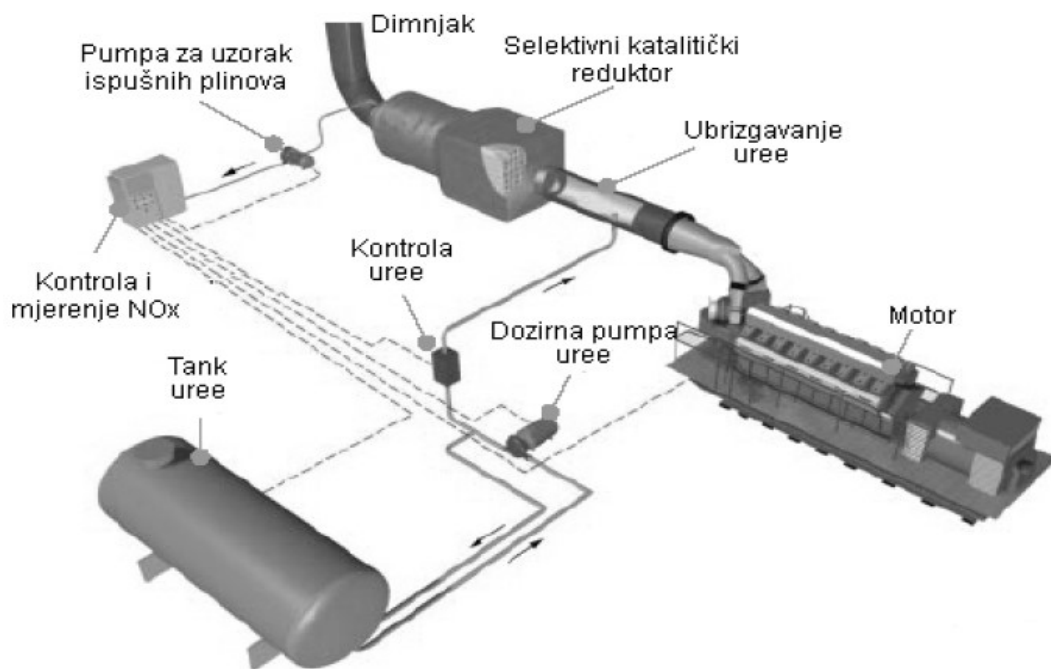
### **Sustav zajedničkog cjevovoda**

Upotrebom sustava zajedničkog cjevovoda (Common Rail System) postignut je bezdimni rad pri manjim brojevima okretaja te značajno smanjenje emisije NO<sub>x</sub>-a. Razlog tome je što je postignuto bolje izgaranje goriva koje se postiže održavanjem tlaka ubrizgavanja na optimalnom nivou pri svim brzinama te selektivnim zatvaranjem ubrizgača goriva i optimiziranim otvaranjem i zatvaranjem ispušnih ventila. [23]

#### 4.2.2. Sekundarne metode

##### Selektivna katalitička redukcija

Selektivna katalitička redukcija je trenutno najefikasnija metoda smanjivanja emisije  $\text{NO}_x$ -a čijom se upotrebom emisija smanjuje za 85% do 95%. Reducirajuće sredstvo (urea) se dodaje se ispušnim plinovima pri temperaturi od 290 do 450 [°C]. Urea se u ispušnim plinovima raspada na amonijak koji tada prolazi kroz proces katalizacije koji pretvara  $\text{NO}_x$  na bezopasni dušik i vodu. Ovom metodom se može dostići nivo  $\text{NO}_x$ -a od 2 [g/kWh] ili niže, a CO je u skladu s najstrožim dopuštenim nivoom. [23]



Slika 22. Selektivna katalitička redukcija [23]

##### Upotreba goriva s malim postotkom sumpora

Emisija  $\text{SO}_x$ -a ovisi direktno o postotku sumpora u gorivu, pa je stoga najjednostavnija i najjeftinija metoda za smanjenje emisije  $\text{SO}_x$ -a smanjenje sumpora u gorivu. Teška brodska goriva koja se koriste na brodovima u prosjeku sadrže 3% sumpora. Upotreba goriva s niskim postotkom sumpora rezultira dodatnim troškovima (radi veće cijene tih goriva) što se kompenzira zbog veće kvalitete tih goriva manjim trošenjem dijelova motora, uštedom na ulju za podmazivanje te manjom potrebom za održavanje. Također, motor radi mirnije s manjim rizikom od problema u radu. [23]

## **Sustav smanjenja emisije pomoću plazme**

Princip rada za ispušne plinove dizel motora baziran je na površinskom oslobađanju. Plazma se stvara pomoću izmjeničnog visokog napona koji razbija plin između dvije elektrode. Područje između dvije elektrode ispunjeno je materijalom, što rezultira razbijanjem napona u prazninama između materijala. Vrijeme razbijanja napona iznosi nekoliko nanosekunda. [23]

### **4.3. TURBOPUHALO**

Turbopuhalo je element koji se sastoji od kompresora pogonjenog turbinom na ispušne plinove.

Razlikujemo dvije izvedbe prednabijanja s turbopuhalom: [30]

- impulsno prednabijanje
- prednabijanje konstantnim tlakom.

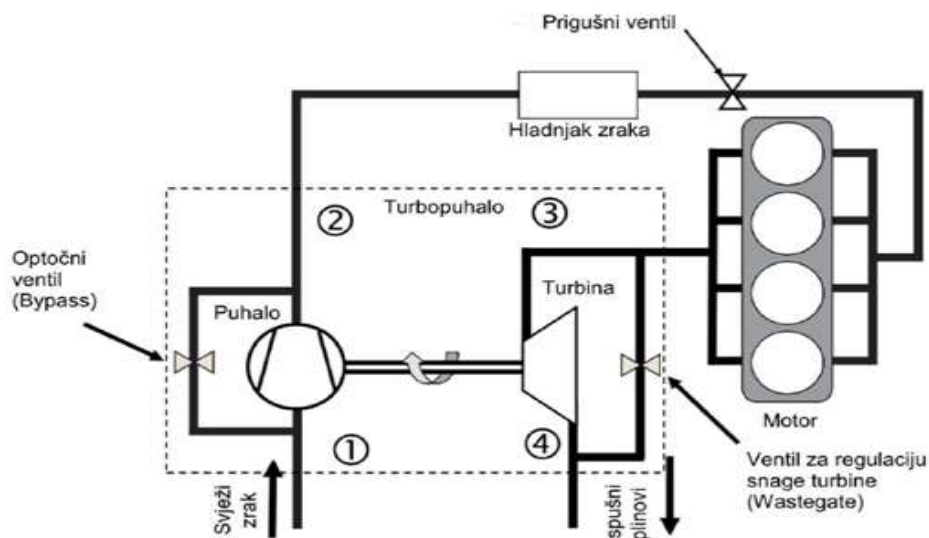
Svrha prednabijanja je povećanje punjenja cilindra zrakom, a time i izlazne snage iznad one koju razvija dvotaktni motor s jednostavnim ispiranjem: [4]

- smanjen potreban prostor (manje cilindara, kraći motor)
- lakši motor, povoljnija specifična težina
- veća efikasnost (ravnija karakteristika potrošnje goriva)
- veća specifična snaga zbog povećanja srednjeg efektivnog tlaka
- niža cijena po jediničnoj izlaznoj snazi, posebice kod velikih motora
- ispušna buka je smanjena turbinom na ispušne plinove
- manji gubici snage kod smanjenja gustoće zraka okoline
- niže emisije ispuha.

Osnovni dio kompresora (kao i turbine) je rotor s rotorskim lopaticama koji rotira i stlačuje zrak na viši tlak koji se zatim usisava u prostor izgaranja. Zakretanje rotora kompresora ostvaruje turbina koja je ugrađena na drugom kraju vratila tako da imaju jednaki broj okretaja, a čiju rotaciju omogućavaju ispušni plinovi. Kao rezultat stlačenog zraka koji se usisava u prostor izgaranja dobiva se znatno povećanje snage i do 50% više u odnosu na motore sa slobodnim usisom. Iako se na brodskim motorima koristi više vrsta turbopuhala (centrifugalnih), svi oni rade na istim principima: [26]

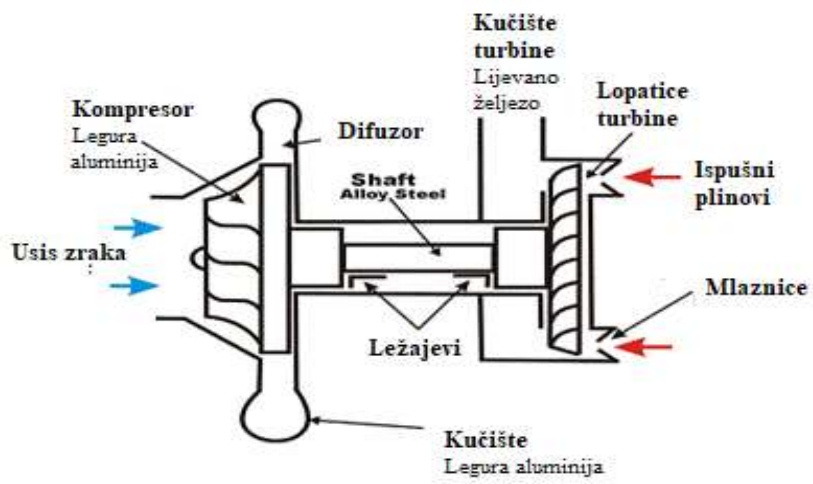
- ispušni plinovi izgaranja pogone turbinu
- turbina preko impelera (vratila) pokreće kompresor koji nabija prostor izgaranja svježim zrakom

Također, bitna komponenta turbine je i obilazni sigurnosni ventil (engl. *waste gate*) koji dolazi do izražaja pri visokim brojevima okretaja kada bi turbina isporučivala previsoki pritisak prednabijanja. Njegova uloga je da propusti višak plinova izgaranja u atmosferu smanjujući na taj način tlak usisa. U većini slučajeva obilazni sigurnosni ventili su pokretani pneumatskim putem pomoću membrane koja je pod direktnim pritiskom zraka u turbini. [2] Ako je tlak nabijenog zraka u usisnoj cijevi iza kompresora prevelik, tada on toliko potisne membranu u tlačnoj komori da se otvori obilazni ventil (engl. *bypass*) i dio usisnog zraka prolazi pored kompresora.



**Slika 23. Motor s prednabijanjem turbopuhalom i hladnjakom zraka [3]**

Ispušni sustav turbopuhala sastoji se od toplinski otporne lijevane legure koja osigurava ulaz i izlaz ispušnih plinova. Ispušni plinovi ulaze u kućište turbine i udaraju o lopatice turbine te im predaju svoju toplinsku energiju koja se na lopaticama pretvara u kinetičku energiju koja ostvaruje rotaciju turbine velikom brzinom. Rotacijska brzina turbine je automatski regulirana brzinom i opterećenjem motora. [22]



Slika 24. Turbopuhalo [26]

## 5. RASPORED ODRŽAVANJA BRODSKOG ČETVEROTAKTNOG BRZOKRETNOG CATERPILLAR-MAK M32 MOTORA

Tijekom životnoga ciklusa broda od iznimnog je značenja redovito održavanje svih brodskih sustava. Redovitim održavanjem brodskih sustava povećava se pouzdanost, raspoloživost i učinkovitost brodske opreme. Također, izbjegavaju se i indirektni troškovi održavanja. [32]

U tablici 4. prikazani su osnovni parametri i intervali radnih sati koji se koriste kako bi se provodilo redovito održavanje. [27]

**Tablica 4. Tablica radnih naloga [27]**

<b>Podsustavi motora</b>	<b>Radni nalozi</b>	<b>Interval radnih sati za održavanje</b>
<b>Glava cilindra</b>	Provjera zračnosti klipnih prstenova i košuljice cilindra	1500
	Održavanje razvodnog sustava	30000
	Provjera staza ventila/Uljnog prstena	30000
	Održavanje ubrizgača	15000
	Održavanje sigurnosnog ventila	30000
	Provjera usisnog i ispušnog ventila	7500
	Provjera uputnog ventila	1500
	Održavanje uputnog ventila	30000
	Provjera glave cilindra	150
	Održavanje glave cilindra	30000
	Provjera pogonske opreme/Zupčanika	3750
<b>Pogonska oprema</b>	Provjera letećeg ležaja	30000
	Provjera temeljnog ležaja	30000
	Provjera glavnog odrivnog ležajaa	30000
	Provjera klipnih prstenova i utora	30000
	Provjera male glave ojnice	45000



	Zamjena klipa	90000
	Provjera sigurnosnog ventila kućišta koljenastog vratila	1500
<b>Kućište motora</b>	Provjera košuljice cilindra	15000
	Održavanje košuljice cilindra	30000
	Provjera ležaja bregaste osovine	30000
<b>Zupčasti prijenos</b>	Održavanje ležaja bregaste osovine	30000
	Provjera zupčastog prijenosa	15000
	Provjera upravljačkog mehanizma	15000
	Popravak prigušivača vibracija	15000
	Provjera regulatora	24
<b>Upravljački uređaji</b>	Sustav komprimiranog zraka	750
	Ponašanje regulatora	1500
	Promjena ulja regulatora	3750
	Održavanje ležajeva upravljačke osovine	1500
	Održavanje uputnog ventila	7500
	Održavanje upravljačke osovine pumpe za ubrizgavanje	7500
	Provjera upravljačkih ventila	30000
	Održavanje pročistača komprimiranog zraka	7500
	Održavanje turbopuhala	24-300
<b>Sustav ispuha/ Pred-nabijanja</b>	Održavanje turbopuhala	7500-15000
	Dreniranje komprimiranog zraka	24-750
	Provjera pumpe za ubrizgavanje	15000
<b>Sustav goriva</b>	Popravak ubrizgača goriva	7500
	Održavanje Duplex predfiltera goriva	750
	Visokotlačna pumpa	15000
	Blazinica ležaja (visokotlačna pumpa)	15000
	Održavanje ubrizgača	6000
	Nadopuna ulja za podmazivanje	1500-7500
	Održavanje ventila za regulaciju tlaka ulja	15000
	Pumpa za predpodmazivanje	150
	Zaštitni filter ulja za podmazivanje	7500

<b>Sustav podmazivanja</b>	Provjera sustava rashladne vode	750
<b>Sustav rashladne vode</b>	Promjena antikorozivne uljne emulzija	7500
	Održavanje pumpe rashladne vode	15000
	Pregled klipnog mehanizma	75
<b>VT sustav zraka</b>	Filter komprimiranog zraka	7500
	Razvodnik zraka za upućivanje	15000
	Provjera monitora	3750
<b>Sustav nadzora</b>	Provjera zaštite od previsokog tlaka	3750
	Provjera zaštite od prevelikog broja okretaja	7500
	Održavanje regulatora temperature ulja za podmazivanje/Rashladne vode	7500
	Održavanje zaštite od previsokog tlaka	22500
	Provjera sustava za nadzor kućišta koljenastog vratila	750-7500

## 5.1. Turbopuhalo

Remont turbopuhala provodi se pomoću sljedećih smjernica:

- Provjeriti defleksiju divergentne mlaznice.
- Izmjeriti udaljenost između osovine rotora i prirubnice kućišta ležaja na strani kompresora
- Zamijeniti ležaj s obje strane novim (jer je životni vijek ležaja isti kao i vrijeme remonta turbopunjača)
- Očistiti kompresor i turbinu s kemikalijama te temeljito pregledati
- Provjeriti labirintnu brtvenicu
- Očistiti zračnu liniju labirintne brtvenice
- Provjeriti ima li u kućištu znakova oštećenja odnosno istrošenosti
- Provjeriti stanje lopatica
- Nakon ponovnog sastavljanja, provjeriti statičku ravnotežu
- Provjeriti dosjed rotora i kućišta [33]

## 6. ZAKLJUČAK

Pojam izmjene radnog medija podrazumijeva dva sustava, sustav usisa i sustav ispuha, oba podjednako važna za ekonomično iskorištavanje brodskog motora. Osnovna svrha sustava usisa je opskrba prostora izgaranja dovoljnom količinom ispirnog zraka kako bi se isti isprao i ponovno nabio svježim zrakom za sljedeću kompresiju. Sustav usisa mora biti projektiran na način da se buka usisa zraka u prostor izgaranja i mogući gubitci zraka pri strujanju kroz cjevovode svedu na najmanju moguću razinu. Pravilnim projektiranjem sustava usisa te filtriranjem i hlađenjem usisnog zraka osigurava se snižavanje temperature stijenki prostora izgaranja i ubrizgavanje optimalne količine goriva, a time se dobiva maksimalna snaga motora i minimalna emisija NO<sub>x</sub>-a.

Kod sustava ispuha dvotaktnih sporokretnih motora, najveću ulogu ima ispušni ventil koji mora biti projektiran i izveden na način da mogući što jednostavnije strujanje plinova izgaranja u atmosferu.

Pri tome se toplinska energija ispušnih plinova dalje upotrebljava za pokretanje turbopuhala, za proizvodnju pare za grijanje, itd.

Imajući sve gore spomenuto na umu, kao zaključak se nameće da je u proizvodnji brodskih motora primarno postići maksimalnu učinkovitost brodskog motora uz čim manju emisiju ispušnih plinova.

## LITERATURA

- [1] Milić, L.: *Brodski dizelski motori I*, Pomorski odjel, Dubrovnik, 2002.
- [2] Mahalec, I.; Lulić, Z.; Kozarac, D.: *Motori s unutarnjim izgaranjem*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [3] Radica, G.: Autorizirana predavanja iz kolegija Brodski motori, Pomorski fakultet, Split.
- [4] Komar, I.: Autorizirana predavanja iz kolegija Brodski motori, Pomorski fakultet, Split.
- [5] Sućur, N.: Analiza dotrajalosti bregaste osovine četverotaktnog motora s unutarnjim izgaranjem, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [6] [https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cetverotaktni\\_motor#/media/File:Four\\_stroke\\_cycle\\_intake.png](https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cetverotaktni_motor#/media/File:Four_stroke_cycle_intake.png) (pristupljeno 2.svibanj.2018.)
- [7] [https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cetverotaktni\\_motor#/media/File:Four\\_stroke\\_cycle\\_compression.png](https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cetverotaktni_motor#/media/File:Four_stroke_cycle_compression.png) (pristupljeno 6.svibanj.2018.)
- [8] Popović, G.: *Tehnika motornih vozila*, Pučko otvoreno učilište, Zagreb, 2006.
- [9] Parat, Ž.: *Brodski motori s unutarnjim izgaranjem*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.
- [10] <http://famreit.com/20-valve-timing-diagram-for-diesel-engine/valve-timing-diagram-for-diesel-engine-of-4-stroke-impression-including/> (pristupljeno 22.lipanj-.2018.)
- [11] <http://famreit.com/20-valve-timing-diagram-for-diesel-engine/valve-timing-diagram-for-diesel-engine-of-2-stroke-present-gallery-then/> (pristupljeno 22.lipanj.2018.)
- [12] <http://marineengineeringonline.com/scavenging-in-diesel-engines/> (pristupljeno 3.srpanj.2018.)
- [13] <http://marineinfobox.blogspot.com/2016/12/scavenging-marine-diesel-engine.html> (pristupljeno 3.srpanj.2018.)
- [14] Kuiken, K.: *Diesel engines I*, Target Global Energy Training, Onnen, 2008
- [15] Kureta, Ž.: *Osnove brodostrojarstva*, Veleučilište u Dubrovniku, Dubrovnik, 2000.
- [16] Application & Installation Guide, Air Intake System, Caterpillar, 2015, <http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20160713-53120-27352> (pristupljeno 3.srpanj.2018.)
- [17] <http://www.scottmarinepower.com/techtips/2018/3/9/the-air-system-and-the-1000-hr-service-on-marine-diesel-engines> (pristupljeno 4.srpanj.2018.)

- [18] Woodyard, D.: *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines 9th Edition*, Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, Oxford, 2009.
- [19] <https://primeserv.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider5/service-letter-marine/sl2011-542.pdf?sfvrsn=2> (pristupljeno 2.srpnja.2018.)
- [20] Parametri izmjereni na Caterpillar motoru - No: 39145
- [21] Šretner, j.: *Brodski motori s unutarnjim izgaranjem*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1970.
- [22] Chapter 9, Intake and exhaust system, [http://navybmr.com/study%20material/14075a/14075A\\_ch09.pdf](http://navybmr.com/study%20material/14075a/14075A_ch09.pdf) (pristupljeno 3.srpnja.2018.)
- [23] Radica, G.: Razvoj brodskih motora prema IMO propisima za smanjenje emisija ispušnih plinova, Pomorski fakultet u Splitu, 2008.
- [24] Bernečić, D.: *MAN B&W, Wärtsillä ili Mitsubishi*, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2006.
- [25] <http://flamemarine.com/files/MANBW.pdf> (pristupljeno 3.srpnja.2018)
- [26] [http://www.marinediesels.info/Turbocharging/turbocharger\\_principles.htm](http://www.marinediesels.info/Turbocharging/turbocharger_principles.htm) (pristupljeno 3.srpnja.2018)
- [27] Maintenance Schedule\_M32
- [28] Sjekavica, M.: Modeliranje i regulacija modernog dizelskog motora s turbonabijanjem, Zagreb, 2009.
- [29] [https://www.fsb.unizg.hr/miv/MSUI/\\_Dieselovi\\_motori/Mehanizam%20s%20kriznom%20glavom/MTZ-2011-11\\_New%20Two%20stroke%20Marine%20Diesel%20Engines%20from%20W%C3%A4rtsill%C3%A4.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/miv/MSUI/_Dieselovi_motori/Mehanizam%20s%20kriznom%20glavom/MTZ-2011-11_New%20Two%20stroke%20Marine%20Diesel%20Engines%20from%20W%C3%A4rtsill%C3%A4.pdf) (pristupljeno 4.srpanj.2018)
- [30] Radica, G.: Autorizirana predavanja iz kolegija Dijagnostika kvarova, Pomorski fakultet, Split.
- [31] <http://www.machineryspaces.com/Two-stroke-cycle-diesel-engines.html> (pristupljeno 5.srpanj.2018)
- [32] Dobrota, Đ., Komar, I., Račić, N., Lalić, B.: *Brodski energetske sustavi*, Pomorski fakultet, Split, 2014.
- [33] <https://marineengineeringonline.com/maintenance-of-turbochargers/> (pristupljeno 29.kolovoza.2018)

## POPIS SLIKA

Slika 1. Definicija motora s unutarnjim izgaranjem.....	7
Slika 2. Shematski prikaz toplinskog stroja [2].....	7
Slika 4. Proces četverotaktnog motora [4].....	9
Slika 5. Rad četverotaktnog motora s prednabijanjem u p – V dijagramu [28] .....	10
Slika 6. Prvi takt - usis [6] .....	11
Slika 7. Drugi takt - kompresija [7].....	12
Slika 8. Treći takt – izgaranje i kompresija [5] .....	13
Slika 9. Četvrti takt – ispuh [5] .....	14
Slika 10. Proces izmjene radnog medija kod četverotaktnih motora sa slobodnim usisom i kod motora s prednabijanjem [3].....	14
Slika 11. Proces dvotaktnog motora [4] .....	16
Slika 12. Izmjena radnog medija dvotaktnog motora [4] .....	17
Slika 13. Rad dvotaktnog motora u p-V dijagramu [9].....	18
Slika 14. Dvotaktni dizel motor [31].....	19
Slika 15. Shema istosmjernog sustava ispiranja [2] .....	21
Slika 16. Razvodni dijagram četverotaktnog motora [10].....	23
Slika 17. Razvodni dijagram dvotaktnog motora [11] .....	24
Slika 18. Prikaz kretanja ispirog zraka kroz dvotaktni motor [14].....	25
Slika 19. Separator kapljica [19] .....	28
Slika 20. Sustav usisa i ispuha [29] .....	30
Slika 21. Dijelovi ispušnog ventila [32] .....	31
Slika 22. Kompenzacija ispušnih emisija i ulaznih medija brodskog motora [25] .....	32
Slika 23. Selektivna katalitička redukcija [23].....	35
Slika 24. Motor s prednabijanjem turbopuhalom i hladnjakom zraka [3].....	37
Slika 25. Turbopuhalo [26].....	38

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Faze izmjene radnog medija u četverotaktnim dizel motora u stupnjevima okreta koljenastog vratila [4].....	15
Tablica 2. Izmjereni parametri promatranog Caterpillar motora [20] .....	29
Tablica 3. Izmjereni parametri promatranog Caterpillar motora [20] .....	32
Tablica 4. Tablica radnih naloga [27].....	39

## POPIS KRATICA

4T	Četverotaktni motor
2T	Dvotaktni motor
GMT	Gornja mrtva točka
DMT	Donja mrtva točka
DM	Dizel motor
IZ	Ispušni ventil zatvore
OI	Ispušni ventil otvoren
UZ	Usisni ventil/kanal zatvoren
UO	Usisni ventil/kanal otvoren
PUG	Početak ubrizgavanja goriva
ZUG	Završetak ubrizgavanja goriva
CO	Ugljikov monoksid
CO <sub>2</sub>	Ugljični dioksid
SO <sub>x</sub>	Sumporovi oksidi
NO <sub>x</sub>	Dušikovi oksidi
IMO (engl. <i>International Maritime Organization</i> )	Međunarodna pomorska organizacija
ELVA (engl. <i>Electronic Valve Actuator</i> )	Elektro-hidraulički ventil za regulaciju otvaranja ispušnog ventila
CCU (engl. <i>Cylinder Control Unit</i> )	Elektronska upravljačka jedinica za svaki cilindar
ECU (engl. <i>Electronic Control Unit</i> )	Elektronska kontrolna jedinica koja upravlja CCU-ima
rpm (engl. <i>revolutions per minutes</i> )	Okretaja u minuti
kWh	Kilovat sat