

# SUSTAVI DOBAVE GORIVA U BRODSKIM DIZELSKIM MOTORIMA

## *Fuel Supply Systems in Marine Diesel Engines*

Nikola Ulaga, diplomant

prof. dr. sc. Luko Milić, dipl. ing., mentor

Pomorski odjel  
Sveučilište u Dubrovniku

mr. sc. Maro Jelić, dipl. ing., komentor

Pomorski odjel  
Sveučilište u Dubrovniku

UDK 621.436:629.5

### Sažetak

*U ovom radu dan je prikaz sustava dobave goriva suvremenih brodskih dizelskih motora, kod kojih se kontrola rada motora obavlja elektronički. Dani su osnovni elementi sustava dobave goriva MAN-B&W ME motora. Za razliku od klasičnog načina upravljanja radom motora s pomoću razvodne osovine, tvrtka MAN-B&W razvila je sustav elektroničkoga upravljanja radnim procesom kojemu je glavna zadaća kontrola uštrcavanja goriva, otvaranje i zatvaranje ispušnih ventila i podmazivanja cilindara. Elektronički kontroliran motor tvrtke MAN-B&W temelji se na nezavisnom radu pumpa za uštrcavanje goriva i ispušnih ventila tako da se podizači ispušnih ventila i rasprskavači goriva kontroliraju elektronički određenim brojem kontrolnih jedinica koje zajedno čine „kontrolni sustav motora“. Uz prikaz sustava za dobavu goriva MAN-B&W motora, dan je prikaz rada sustava sa zajedničkim vodom dobave goriva u Wartsila motoru, tzv. Common rail sustav, koji se rabi i u Sulzer RT-flex motoru. Na kraju se uspoređuju konvencionalno i elektronički upravljani motori.*

*Ključne riječi: uštrcavanje, gorivo, elektronika, upravljanje, dobava, iskoristivost.*

### Summary

*The paper analyses fuel supply systems in modern marine diesel engines where engine operation is controlled electronically. The basic elements of fuel supply system in MAN-B&W marine engine are analyzed. Unlike traditional method of engine operation by camshaft, MAN-B&W company has developed the system of electronic operation of working process, the main task being the control of fuel injection, opening and closing of exhaust valves and cylinder lubrication. Electronically controlled MAN-B&W engine is based on separately driven fuel injection pump and exhaust valves so that exhaust valve lifters and oil fuel atomizers are controlled electronically by means of a definite numbers of control units making together "engine control system".*

*Besides the analysis of fuel supply system in MAN-B&W engine, common fuel oil supply in Wartsila engines, so called Common rail system, which is also used in Sulzer RT-flex engines, has been presented. Finally traditional and electronic engine operation have been compared.*

*Key words: injection, fuel, electronics, control, supply, efficiency*

## UVOD / Introduction

Dizelski je motor danas najučinkovitiji toplinski stroj koji pretvara toplinsku energiju u korisni mehanički rad. Vrlo važan podsustav brodskih dizelskih motora je sustav dobave goriva, koji se analizira u ovom radu s posebnim naglaskom na pogon i upravljanje dobavom goriva u cilindar motora.

U dugom nizu godina razvoja brodskih dizelskih motora uočena je posebna važnost prilagodbe dobave i uštrcavanja goriva njegovu opterećenju, poradi postizanja stvarnoga termodinamičkog procesa izgaranja goriva što bliže idealnomu kružnom procesu. Pravilno upravljanje početkom i svršetkom dobave goriva, kao i održavanjem konstantnog tlaka pri uštrcavanju, znatno utječu na odlike motora pri različitim radnim režimima, kao što su potrošak goriva i sadržaj štetnih tvari u ispušnim plinovima.

Klasični sustav dobave goriva je u uporabi već dugo godina. Sastoji se od osjetila za mjerenje protoka goriva koje struji u tank za miješanje s gorivom koje se vraća kao preljevano. Iz tog tanka dobavne pumpe usisavaju gorivo i tlače ga kroz zagrijač preko filtra do visokotlačnih pumpa motora. Radi održavanja konstantne viskoznosti goriva ono se zagrijava u zagrijaču vodenom parom. Zagrijavanje goriva regulira se regulacijskim ventilom, prema signalu viskozimetra, propuštanjem odgovarajuće količine pare u zagrijače goriva. Visokotlačne pumpe dobivaju veću količinu goriva od one koju motor troši, višak se vraća u tank za miješanje i tu se miješa s gorivom iz tanka dnevne potrošnje.

Pogon visokotlačnih pumpa, otvaranje ispušnih i usisnih ventila, te razvodnika zraka obavlja se razvodnim vratilom. Dinamika pogona tih elemenata ovisi o obliku izvodnica odgovarajućih brjegovna na razvodnom vratilu. Budući da brodski porivni dizelski motori moraju raditi stabilno i mirno u širokom području radnih režima kako bi mogli razvijati snagu od 30 do 110% nominalne snage, jasno je da dinamika navedenih elemenata, koja ovisi o obliku pojedinih brjegovna na razvodnom vratilu, ne može rezultirati optimalnim radnim procesima u tako širokom području radnih režima u radu motora.

## OSNOVNI ELEMENTI SUSTAVA DOBAVE GORIVA MAN-B&W ME MOTORA / *Basic Elements of Fuel Supply Systems in MAN-B&W ME Engines*

Za razliku od klasičnog načina upravljanja radom motora s pomoću razvodne osovine, tvrtka MAN-B&W razvila je sustav elektroničkog upravljanja radnim procesom kojemu je glavna zadaća kontrola: uštrcavanja goriva,

otvaranja i zatvaranja ispušnih ventila i podmazivanja cilindra. Elektronički kontroliran motor tvrtke MAN-B&W temelji se na nezavisnom radu pumpa za uštrcavanje goriva i ispušnih ventila tako da su podizači ispušnih ventila i rasprskaci goriva kontrolirani elektronički određenim brojem kontrolnih jedinica koje zajedno čine „kontrolni sustav motora“. Pumpe za uštrcavanje goriva elektroničkoga kontroliranog motora mehanički su jednostavnije od onih klasičnih motora s razvodnim vratilom, a stap koji tlači gorivo pogonjen je uljem pod tlakom kojim se upravlja elektronički kontroliranim proporcionalnim ventilima. Kao i kod rasprskaca, podizač ispušnog ventila se također pogoni tlačnim uljem kojim se upravlja kontrolnim ventilom binarnog tipa. U hidrauličnoj petlji rabi se ulje za podmazivanje motora koje se filtrira i tlači u pomoćnoj jedinici za dobavu.

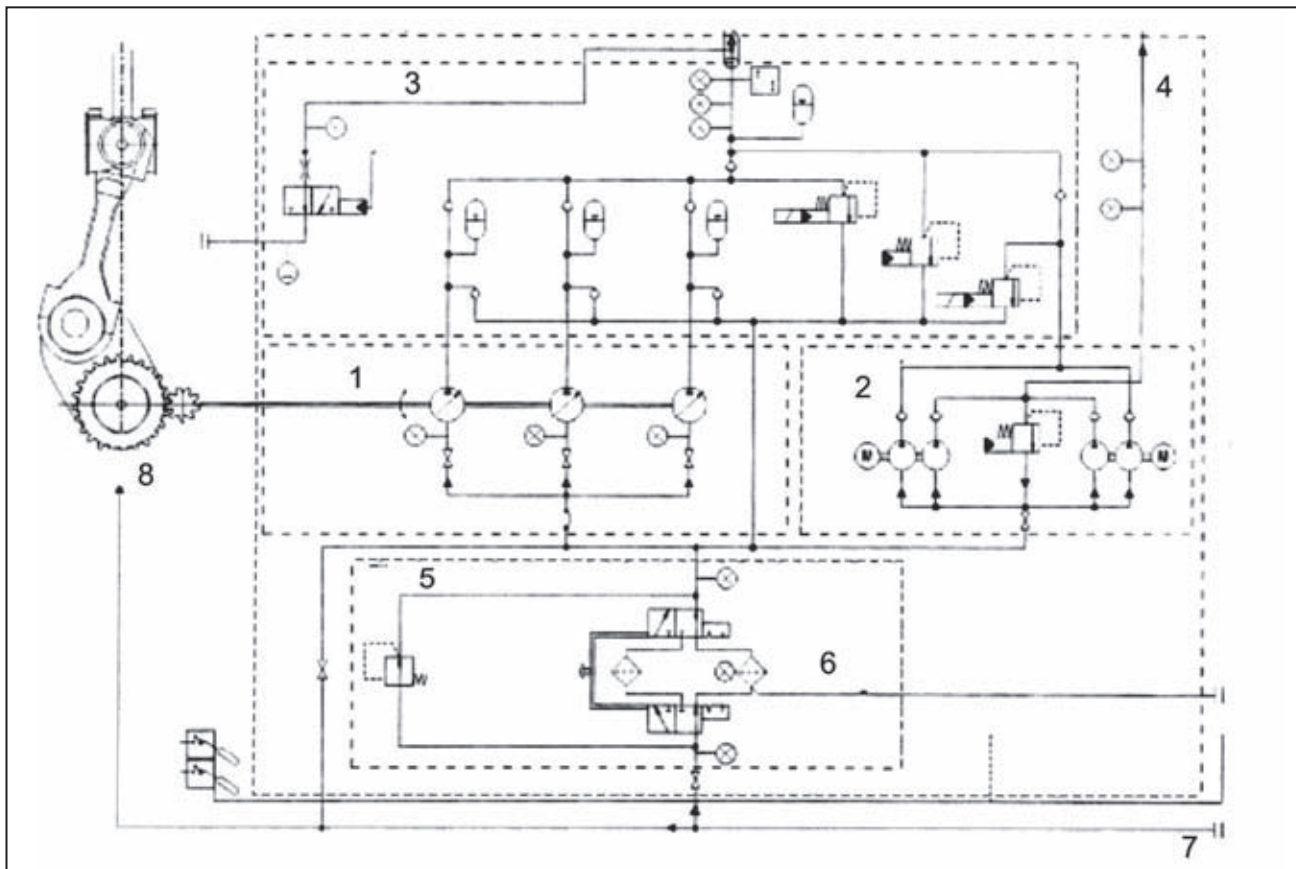
Tvrtka MAN-B&W razvila je elektronički upravljani motor s oznakom ME, za razliku od klasično upravljanih motora s oznakom MC. Elektrohidraulični sustav ME motora zamjenjuje sljedeće komponente klasičnoga MC motora:

- lanac za pogon razvodne osovine,
- razvodnu osovinu,
- mehanizam za pogon visokotlačne pumpe goriva, uključujući vodilice i sustav za preketanje,
- konvencionalne pumpe,
- mehanizam za otvaranje ispušnog ventila,
- razvodnik zraka kojim se upravlja zrakom pri upućivanju motora,
- regulacijsko vratilo,
- mehanički pogonjen uređaj za podmazivanje cilindra.

Ti elementi zamijenjeni su u ME motora:

- hidrauličnim uređajem za dobavu ulja,
- osjetilom položaja koljenastog vratila,
- hidrauličnim cilindarskim jedinicama,
- elektronički kontroliranim uputnim ventilima,
- integralnom elektroničkom kontrolom pomoćnih turbopuhala,
- integralnim elektroničkim regulatorom,
- elektronički kontroliranim uređajem za podmazivanje cilindra.

Cilj uporabi novoga elektroničko-hidrauličnog servomehanizma za kontrolu uštrcavanja goriva i pogona ispušnog ventila je da se razdvoji vremenski uvjetovan slijed uštrcavanja goriva i otvaranja ispuha od mehaničke povezanosti s koljenastim vratilom, i da se na taj način poveća fleksibilnost radu motora.



Slika 1. Hidraulički sustav: 1 – privještene pumpe, 2 – pumpe pogonjene elektromotorom, 3 - sigurnosni i akumulatorski blok, 4 – napajanje uljem niskog tlaka, 5 – filtarska jedinica, 6 – povrat ulja, 7 – dovod ulja, 8 – ulaz ulja za podmazivanje u motor

Figure 1. Hydraulic system: 1 – engine driven pump, 2 – electro-motor driven pump, 3 – safety and accumulator block, 4 – low pressure oil supply, 5 – filter unit, 6 – oil return, 7 – oil delivery, 8 – lubrication oil inlet

Hidraulično uštrcavanje i aktiviranje ispušnih ventila omogućeno je hidrauličnim sustavom dobave ulja s mehanizmom koji omogućuje siguran i stabilan rad (slika 1.). Kao hidraulični medij upotrebljava se ulje iz sustava za podmazivanje motora. Ulje se pročišćava filtarskim sklopom do potrebne kvalitete čistoće za uporabu u hidrauličnom sustavu. Kad je motor u pogonu, ulje se tlači privještenim pumpama ulja, a kad je motor zaustavljen, ulje se tlači električno pogonjenim pumpama.

U akumulatorskom bloku tlačeno se ulje akumulira kako bi osiguralo stabilnu dobavu ulja do hidrauličnih cilindričnih jedinica. Na svakom cilindru motora ugrađena je hidraulična cilindrična jedinica s razvodnim blokom koja hidraulički aktivira visokotlačnu pumpu ulja i aktuator ispušnog ventila. Na razvodnom bloku ugrađeni su elektronički kontrolni ventili za nadzor rada visokotlačnih pumpa goriva i ispušnih ventila.

Sustav uštrcavanja goriva sastoji se od hidraulički pogonjenih visokotlačnih pumpa goriva kontroliranih elektroničkim ventilom, od visokotlačnih cijevi goriva i rasprskavača goriva. Sustav aktiviranja ispušnih ventila sastoji se od elektrohidrauličnog aktuatora kontroliranoga elektroničkim ventilom, visokotlačnih cijevi ulja, te ispušnih ventila. Uputni se ventili pneumatski otvaraju aktiviranjem elektromagnetskih ventila koji se elektronički kontroliraju.

Hidraulični sustav dobave ulja sastoji se od:

- sklopa za filtriranje ulja,
- pumpe ulja pogonjene električnim motorom,
- zupčastog prijenosa za pogon privještenih pumpa ulja,
- privještenih pumpa ulja,
- tanka s osjetilom—dojavljivačem za otkrivanje propuštanja ulja.

Filtar ulja hidrauličnog sustava je samočistilac s automatskim ispiranjem filtarskih elemenata. Ispiranje se obavlja s pomoću komprimiranog zraka u određenim vremenskim intervalima. Regulacija vremenskih intervala ovisi o kvaliteti čistoće ulja. Ako se pojavi veća razlika u tlaku ulja od 0,3 bara na ulazu i izlazu iz filtra, osjetilo tlaka aktivira ponovno automatsko ispiranje. Pomoćni filter ulja je ugrađen paralelno s automatskim filtrom a rabi se kad se taj filter čisti. Prebacivanje s jednoga na drugi filter obavlja se ručno bez prekida dobave ulja u sustavu ulja.

Radi sigurnosti rada automatskog filtra ugrađen je automatski *by-pass* ventil koji se automatski otvori ako iz bilo kojeg razloga padne tlak u sustavu ulja iza filtarskog sklopa. U tom slučaju ulje se filtrira preko filtera sustava ulja za podmazivanje motora. Otvaranje automatskog *by-pass* ventila ulja dojavljuje se osjetilom—dojavljivačem tlaka preko kontrolnog sustava motora.

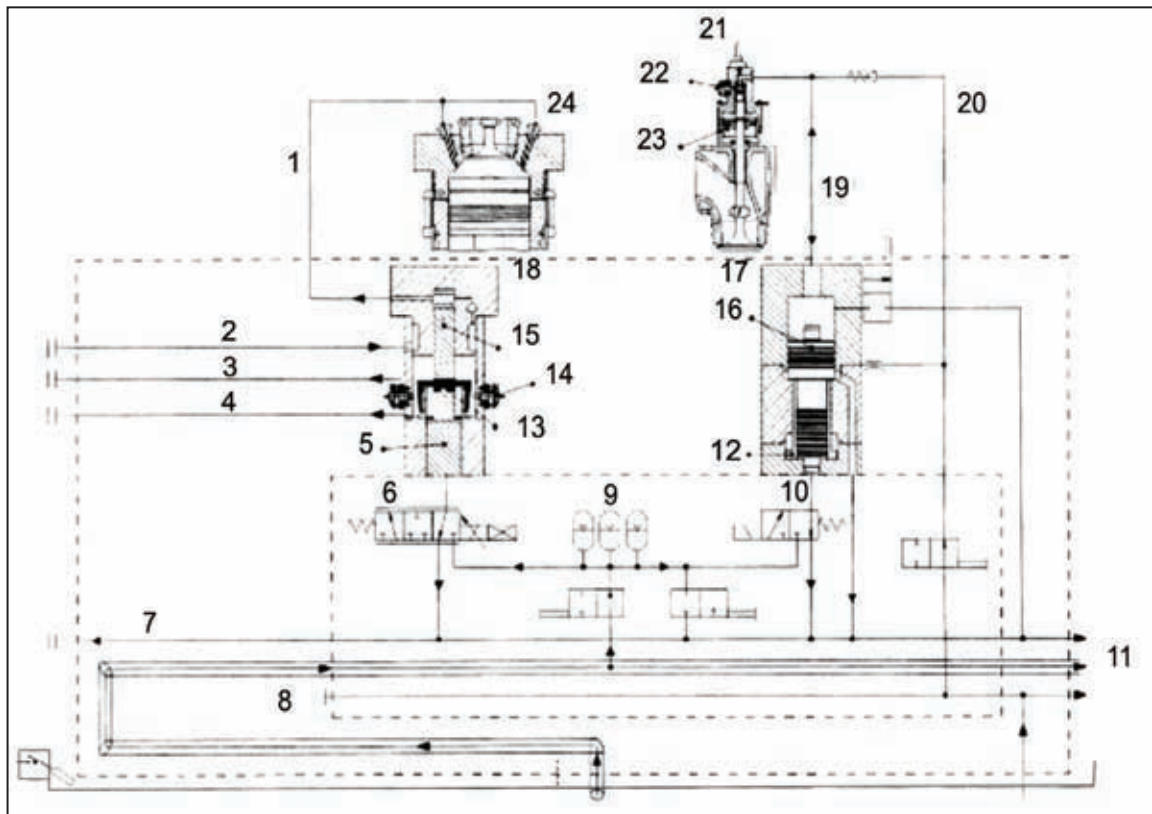
Uporaba na taj način nedostatno filtriranog ulja povećava istrošenost komponenta u sustavu ulja te je potrebno što prije očistiti automatski filter ulja. Automatski filter izveden je s propusnom mrežom filtriranja od 10 nm, pomoćni filter ulja s propusnom mrežom filtriranja od 25 nm, a filter sustava za podmazivanje motora s 34 do 48 nm finoće propusne mreže.

Za osiguranje potrebnog tlaka ulja u hidrauličnom sustavu kad je glavni motor zaustavljen i kad nema hidraulične potrošnje ulja, upotrebljavaju se električno pogonjene zupčaste pumpe. Kad je glavni motor zaustavljen, potreban je malen kapacitet potrošnje ulja, tako da su te pumpe relativno malog kapaciteta u usporedbi s privješanim pumpama. Pumpe ulja izvedene su u dva niza i pogonjene su električnim motorom. Svaki se niz sastoji od pumpe visokog tlaka za hidrauličnu dobavu ulja i pumpe niskog tlaka ulja za punjenje i dopunjavanje hidrauličnog podizača ispušnog ventila.

Ako se motor iz bilo kojeg razloga naglo zaustavi (tzv. "Shut-down") ili pri gubitku napajanja brodskog sustava električnom energijom (tzv. "Black-out"), električno pogonjene pumpe ulja preuzimaju dobavu ulja u sustav, te rade određeno vrijeme radi podizanja tlaka ulja u sustavu potrebnoga za normalan rad motora. Dužina vremena određena je kapacitetom akumulatora u sustavu i kapacitetom uljnog protoka električno pogonjenih pumpa visokog tlaka.

U sustavu hidrauličnog podizača ispušnog ventila ugrađen je prekotalčni ventil koji vraća ulje na usisnu stranu pumpe ako se povisi i prekorači tlak ulja. Jedan niz električnih pumpa ulja uvijek je dostatan za rad motora. Dva niza pumpe su izvedena radi osiguranja pouzdanosti sustava i ako jedan niz otkaže. Rad visokotalčnih i niskotalčnih pumpa ulja nadgleda se osjetilima tlaka spojenima na sustav kontrole motora.

Hidraulične cijevi ulja između hidraulične dobave ulja (HPS) i hidrauličnih jedinica cilindra (HCU) radi sigurnosti od pucanja izrađene su kao cijev u cijevi, to jest cijevi s dvostrukom stijenkom. Takva je izvedba također ugrađena iz istog razloga između svake HCU. Unutarnje i vanjske cijevi spojene su odvojenim linijama na razvodni blok. Prostor između unutarnje i vanjske cijevi spojen je na liniju za otkrivanje propuštanja ulja. Na liniji je ugrađen tlačni kontrolni ventil. Pri malom propuštanju u unutarnjoj cijevi, osjetilo protoka ulja daje signal za alarm. Pri jakom propuštanju ulja povisuje se tlak ulja u liniji za propuštanje; povišeni tlak ulja zatvara tlačni kontrolni ventil, pa se tlak sustava ulja prenosi kroz vanjsku cijev. Osjetilo tlaka daje alarm i indikaciju da je vanjska cijev pod tlakom sustava ulja. Sustav može raditi na taj način sve dok je popravak ili zamjena unutarnje cijevi moguća.



Slika 2. Hidraulična jedinica cilindra: 1 – visokotlačna cijev goriva, 2 – ulaz goriva, 3 – izlaz goriva, 4 – preljev goriva, 5 – hidraulični klip, 6 – ELFI ventil, 7 – povrat ulja, 8 – dobava niskog tlaka. 9 – razvodni blok, 10 – ELVA ventil, 11 – prema sljedećemu razvodnom bloku, 12 – hidraulični klip, 13 – zaštitno brtvljenje, 14 – pozicijski pokazivač, 15 – klip pumpe goriva, 16 – aktivacijski klip, 17 – podizač ispušnog ventila, 18 – pumpa goriva, 19 – hidraulični podizač, 20 – dobava ulja za hidraulični podizač ispušnog ventila, 21 – ispušni ventil, 22 – pozicijski pokazivač, 23 – zračna opruga, 24 – rasprski goriva

Figure 2. Hydraulic cylinder unit: 1 – high pressure fuel pipe, 2 – fuel oil inlet, 3 – fuel oil outlet, 4 – fuel overflow, 5 – hydraulic plunger, 6 – ELFI valve, 7 – fuel oil return, 8 – low pressure supply, 9 – distribution block, 10 – ELVA valve, 11 – to the following distribution block, 12 – hydraulic plunger, 13 – prevention sealing, 14 – positioning indicator, 15 – fuel pump piston, 16 – activity piston, 17 – exhaust valve lifter, 18 – fuel oil pump, 19 – hydraulic lifter, 20 – fuel oil supply for hydraulic exhaust valve lifter, 21 – exhaust valve, 22 – positioning indicator, 23 – air spring, 24 – fuel oil injectors.

Na slici 2. prikazana je hidraulična jedinica cilindra (HCU). Za svaki cilindar motora potrebna je jedna HCU. Te jedinice smještene su na vrhu stroja u visini poklopaca motora. Jedinica se sastoji od razvodnog bloka, sustava elektroničke kontrole uštrcavanja goriva i sustava elektroničke kontrole pogona ispušnog ventila.

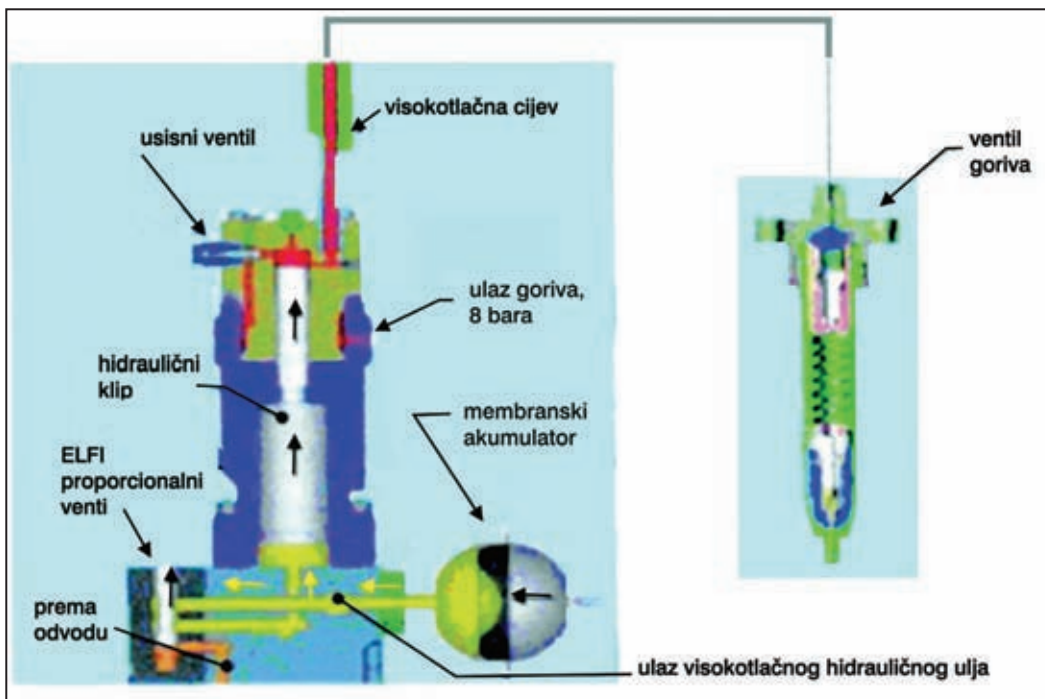
HCU tlačenjem ulja pogoni aktuator ispušnog ventila i visokotlačnu pumpu goriva. Tlačenje i rad aktuatora ispušnog ventila kontrolira elektronički kontrolni ventil ELVA. Tlačenje i rad visokotlačne pumpe goriva nadzire elektronički proporcionalni kontrolni ventil uštrcavanja goriva ELFI. Tlak dobave goriva s početnih 8 do 10 bara podiže se na tlak uštrcavanja, ovisno o opterećenju motora, od 600 do 1.000 bara.

Zadaća razvodnog bloka je da razvede hidraulično ulje do elektronički kontroliranih ventila ugrađenih na razvodnom bloku. Na razvodnom bloku ugrađen je hidraulični akumulator pod tlakom dušika. Namjena hidrauličnih akumulatora je osigurati stabilan tlak i protok ulja potrebnoga za uštrcavanje goriva i aktiviranje ispušnih ventila. Ručnim ventilima može se potpuno isključiti pojedina hidraulična jedinica cilindra ako ona nepravilno radi. Isključiti jedinice moguće je za vrijeme rada motora. U tom slučaju, kad motor radi bez jedne jedinice (s isključenim cilindrom), on zahtijeva poseban radni režim, to jest smanjenje opterećenja motora. Takvi specijalni radni režimi motora dani su u instruktivnim knjigama proizvođača motora.

## SUSTAV DOBAVE GORIVA MAN-B&W MOTORA / Fuel Supply System in MAN-B&W engines

Slika 3. prikazuje sustav goriva za jedan cilindar. Pojedine komponente visokotlačne pumpe goriva (*Fuel Oil Pressure Booster*) mehanički su puno jednostavnije nego tradicionalna visokotlačna pumpa goriva s promjenljivim vremenom uštrcavanja goriva (VIT—*Variable Injection Timing*).

Sustav hidrauličnog uštrcavanja goriva nadziran je elektronički i sastoji se od: hidraulički pogonjene pumpe za uštrcavanje goriva, elektronički kontroliranog ELFI ventila, visokotlačnih cijevi goriva i rasprskачa goriva. Rad elektroničkoga kontrolnog ventila ELFI prati se elektroničkim sustavom motora; konstruiran je tako da svojom izvedbom brzo i precizno nadzire uljni protok do visokotlačne pumpe goriva.



Slika 3. Sustav hidrauličnog uštrcavanja goriva  
Figure 3. Hydraulic fuel injection system

Tlačeno ulje djeluje na donju površinu hidrauličnog klipa aktuatora uštrcavanja goriva prema gore. To gibanje klipa aktuatora prema gore, podiže tlak uštrcavanja goriva i do 1.000 bara, ovisno o opterećenju motora. Završetak uštrcavanja goriva određuje elektronički kontrolirani ventil ELFI prema signalu elektroničkoga sustava motora. Otvaranjem povratnoga voda ulja, ulju naglo padnu tlak i sila koja djeluje na donju stranu hidrauličnog klipa. Gorivo svojim dobavnim tlakom od 8 do 10 bara ulazi kroz usisni ventil u cilindar visokotlačne pumpe goriva i potiskuje klip prema dolje.

Izvedba visokotlačnih cijevi i rasprskачa goriva jednaka je kao i u MC motoru. Izvedba sustava goriva

dopušta konstantnu cirkulaciju goriva kroz rasprskачe te sustav održava na radnoj temperaturi za vrijeme prestanka rada motora.

Visokotlačna pumpa goriva je u sklopu hidraulične cilindrične jedinice smještene na vrhu motora u visini poklopaca cilindra. Glavni su dijelovi visokotlačne pumpe su:

- Hidraulički klip djelovanjem tlačenog ulja pogoni klip visokotlačne pumpe na kojemu se ostvaruje porast tlaka na tlak ubrizgavanja goriva ovisno o odnosu između površina na koje djeluje ulje hidrauličke i površine klipa kojom se djeluje na gorivo.
- Dobavni tlak goriva od 8 do 10 bara svladava oprugu usisnog ventila, otvara ga, te tako omogućava punjenje cilindra gorivom. Taj je ventil izveden kao nepovratni, tako da u tlačnom

hodu sprječava nabijanje goriva na usisnu stranu ventila.

- U razvodnom bloku ugrađen je elektronički kontrolirani ventil (ELFI). Ovisno o položaju elektroničkoga kontrolnog ventila, razvodni blok svojim vodovima spaja tlačnu ili odvodnu stranu hidrauličnog ulja. Na razvodni blok djeluje akumulator ulja.
- U kućištu elektronički kontroliranog ventila uštrcavanja goriva (ELFI) nalazi se klip koji, ovisno o elektroničkoj kontroli motora, s pomoću sklopke propušta hidraulično ulje do hidrauličnog klipa ili u odvod.

- U kućištu akumulatora ugrađena je membrana koja dijeli prostor kućišta na dva dijela. Jedna je strana ispunjena dušikom pod tlakom od 200 bara. Na drugu stranu membrane djeluje hidraulična dobava ulja uz tlak od 200 bara. Takvom izvedbom s dušikom u jednom dijelu kućišta pod tlakom od 200 bara, osigurava se stabilan tlak i protok hidrauličnog ulja.

U momentu kad indukcijska magnetska sklopka elektronički kontroliranog ventila uštrcanja goriva (ELFI) s pomoću elektroničke kontrole motora dobije signal prekida napajanja električnom energijom, klip elektroničkog kontrolnog ventila ELFI silom opruge pomakne se u donji položaj i tako otvori povratni vod ulja iz hidraulične komore u spremnik. U trenutku kad je hidraulično ulje pod visokim tlakom, zbog otvaranja povratnog voda, došlo na razinu tlaka nižu od dobavnog tlaka goriva, gorivo ulazi kroz usisni ventil u cilindar visokotlačne pumpe, potiskuje klip a preko njega i hidraulični klip pojačanja tlaka prema dolje.

Kad indukcijska magnetna sklopka elektronički kontroliranog ventila uštrcavanja ELFI s pomoću elektroničke kontrole motora dobije signal za napajanje električnom energijom, magnetna sklopka svlada silu opruge klipa ventila ELFI, te ga povuče u gornji položaj i time zatvori povratni vod ulja. U tom položaju ELFI ventila, hidraulično ulje visokog tlaka prolazi kroz kontrolni ventil, puni hidrauličnu komoru, djeluje na donju stranu klipa i potiskuje ga prema gore. Aktuator uštrcavanja tlači gorivo, koje zatvara usisni ventil goriva, a kad tlak goriva svlada otpor opruge rasprskavača, otvara se prolaz gorivu u komoru izgaranja, i tada počne uštrcavanje goriva.

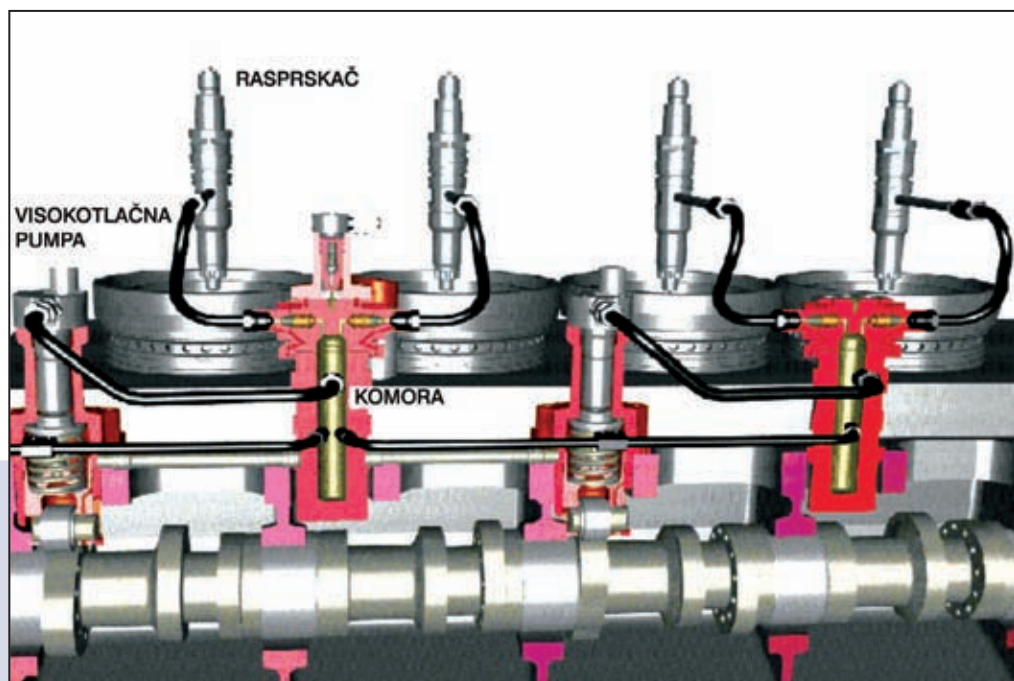
Ako iz bilo kojeg razloga nestane napajanja električnom energijom, sila će opruge gurnuti klip ELFI ventila prema dolje i prestat će uštrcavanje goriva.

Ispušni se ventil također kontrolira hidraulikom s pomoću dvofaznoga hidrauličnog podizača ispušnog ventila pogonjenoga kontrolnim uljem kroz elektronički nadziran binarni ventil, a zatvara se zračnom oprugom. Ispušni ventil ima krajnji dosjed, a da bi se izbjegle prevelike sile pri udaru, opremljen je hidrauličnim prigušivačem.

### SUSTAV ZAJEDNIČKOG VODA DOBAVE GORIVA WARTSILA MOTORA (COMMON RAIL SUSTAV) / Common Rail System in Wartsila Engines

Na slici 4. prikazan je sustav dobave goriva u Wartsila motoru sa zajedničkim vodom. Sustav radi na sljedećem principu: gorivo booster pumpom dolazi do visokotlačnih pumpa koje se pogone razvodnim vratilom kao i kod konvencionalnog motora. U ovom slučaju je za svaka dva cilindra postavljena po jedna visokotlačna pumpa i jedna zajednička komora.

Sve su komore međusobno povezana visokotlačnim cijevima radi izjednačavanja tlaka i povećanja zalihanosti sustava, što olakšava rad motora na djelomičnom opterećenju ako prestane rad jedne ili više pumpa. Gorivo, nakon što mu je tlak u visokotlačnim pumpama podignut na oko 1.600 bara, struji kroz visokotlačne cijevi do zajedničkih komora, u kojima se akumulira i uklanjaju se moguće oscilacije tlaka u sustavu.



Slika 4. Common rail (CR) sustav tvrtke Wartsila

Figure 4. Common rail system in Wartsila

Nakon komora visokotlačnim cijevima gorivo struji do rasprskaača s konstantnim tlakom pri svim brzinama vrtnje i pri svim opterećenjima motora. Gorivo se uštrcava u cilindar tek kad rasprskaač dobije elektronički signal iz glavnog sustava upravljanja. Važno je naglasiti da je cijeli sustav upravljan elektronički, što znači da su i vrijeme početka uštrcavanja i količina uštrcanoga goriva točno određeni samo glavnim elektroničkim sustavom upravljanja.

Sustav zajedničkog voda sastoji se od sljedećih komponenta:

- visokotlačnih pumpa goriva,
- kontrolnih ventila,
- rasprskaača,
- zajedničkih komora,
- elektroničkog sustava upravljanja.

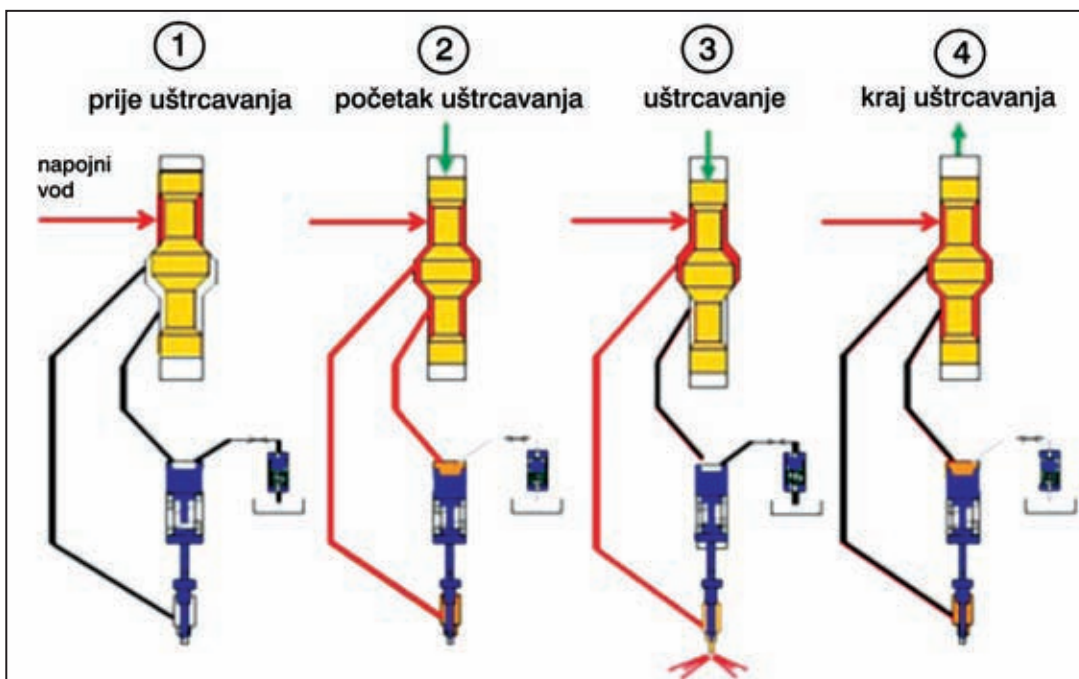
Visokotlačna pumpa goriva u *Common rail* (CR) sustavu razlikuje se od one u konvencionalnih sustava, a glavna je razlika u radnom tlaku, koji u CR sustavu iznosi do 1.600 bara. Pumpa u CR sustavu služi za konstantno održavanje tlaka goriva, dok se u konvencionalnom njome određuje količina i vrijeme uštrcavanja goriva. Pogone se razvodnim vratilom, samo što su kod CR sustava na vratilu do tri brijega, a kod konvencionalnoga su jedan ili dva brijega.

Kontrolni je ventil elektromagnetskog tipa i postavlja se između zajedničke komore i svakoga pojedinog rasprskaača, a u nekim izvedbama može biti i na samom rasprskaaču. On ima više funkcija, a glavna je: propustiti točno određenu količinu goriva u točno određenom vremenu i zaštititi iglu rasprskaača od djelovanja

konstantno visokog tlaka goriva. Time se postižu dvije bitne zadaće: spriječiti neželjeno propuštanja goriva u cilindar zbog neispravnog rasprskaača i zaštita igle rasprskaača od stalnog djelovanja visokog tlaka goriva. Na slici 5. prikazano je načelo rada kontrolnog ventila:

- pozicija 1 - ventil je zatvoren, gorivo je pod visokim tlakom do kontrolnog ventila i tako se štiti rasprskaač od djelovanja goriva pod visokim tlakom na iglu rasprskaača,
- pozicija 2 - djelovanjem elektromagneta klip se ventila giba prema dolje, čime se omogućava prolazak gorivu pod visokim tlakom do rasprskaača s donje i gornje strane, što sprječava iglu da se podigne sa sjedišta i prolazak gorivu u cilindar motora,
- pozicija 3 - kad je klip ventila u krajnjemu donjem položaju, zatvara se dovod goriva na gornji dio rasprskaača, a dio goriva koji se nalazio u tom gornjem dijelu rasprskaača odvodi se u preljev, pa u tom trenutku počinje uštrcavanje goriva u cilindar i ono traje dok je klip kontrolnog ventila u donjem položaju,
- pozicija 4 - prekidanjem strujnog kruga elektromagnet podiže klip kontrolnog ventila koji zatvara prolazak gorivu pod visokim tlakom do rasprskaača, igla zatvara prolazak gorivu, čime je završen proces uštrcavanja.

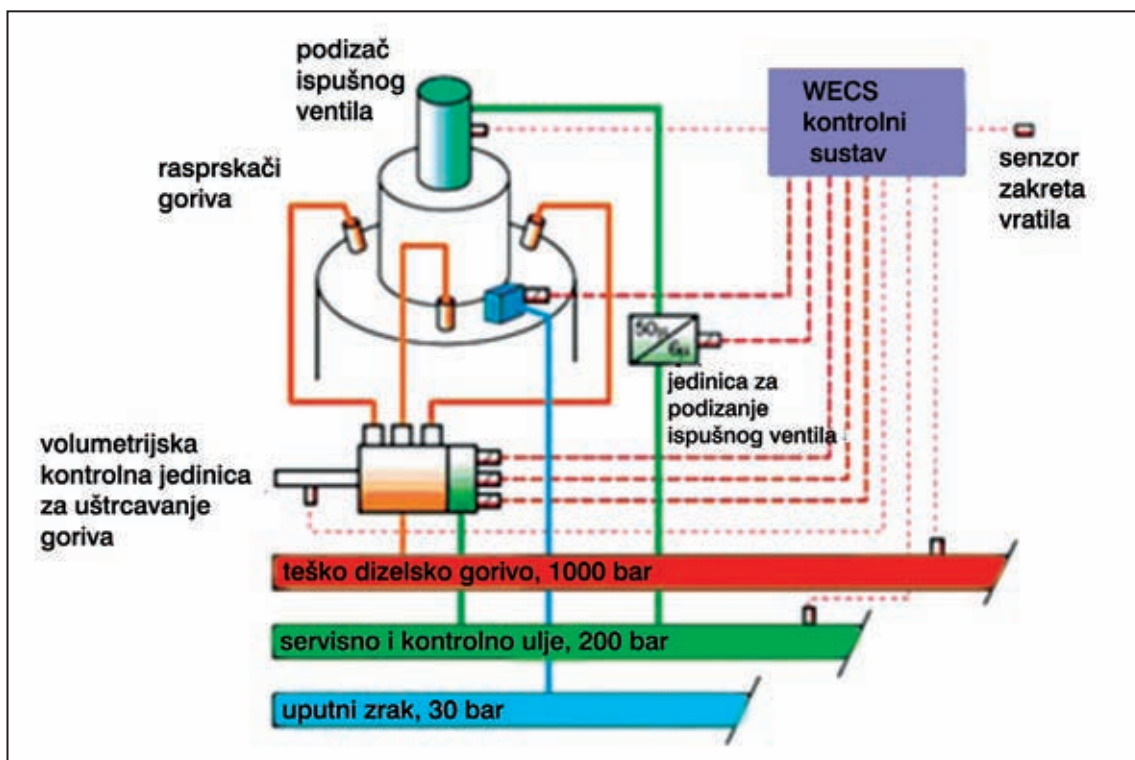
Sustav zajedničkog voda implementiran je na motorima Sulzer RT-flex tvrtke Wartsila Sulzer. To je u osnovi standardni Sulzer RTA sporokretni dvotaktni motor na kojemu je primijenjen sustav zajedničkog voda „common rail“ s elektroničkom kontrolom rada motora.



Slika 5. Rad kontrolnog ventila

Figure 5. Check valve operation





Slika 6. Shema sustava RT-flex motora

Figure 6. Scheme of RT-flex engine system

Glavni dijelovi sustava su: zajedničke komore, visokotlačne pumpe, filtri servo-ulja i integrirani elektronički sustav kontrole, uključujući osjetilo kutne brzine koljenastog vratila. Na slici 6. shematski je predložen sustav teškoga goriva s tlakom višim od 1.000 bara, servo-ulja tlaka od 200 bara, kontrolnoga ulja tlaka od 200 bara i sustav uputnog zraka.

Visokotlačnu pumpu pogoni razvodna osovina s po tri brijega i ona se razlikuje od klasičnih razvodnih osovina, koje su znatno veće i imaju drugu funkciju. Tlak i količina goriva reguliraju se i određuju na ulazu u pumpu tako da ne dolazi do nepotrebnog tlačenja veće količine goriva, čime se štedi energija. Pumpa tlači gorivo u zajednički kolektor iz kojega dvije međusobno neovisne cijevi obložene dvostrukom stijenkom vode uspravno do zajedničke komore. Svaka od tih cijevi dimenzionirana je za protok maksimalno potrebne količine goriva radi nesmetanog rada motora pri eventualnom puknuću jedne od cijevi.

Zajednički kolektor opremljen je prekotlačnim sigurnosnim ventilom s tlakom otvaranja od 1.250 bara.

Servo-ulje se rabi za otvaranje i nadzor ispušnih ventila. Dobava se tog ulja ostvaruje klipno-aksijalnim pumpama sa zakretnom pločom privješenoj na glavnu dobavnu pumpu. Nominalni radni tlak pumpe je 200

bara a broj pumpa ovisi o broju cilindara i snazi motora. Za servo-ulje rabi se standardno ulje za podmazivanje motora i dobiva se iz glavnog sustava podmazivanja motora. Servo-ulje se pročišćava u automatskom filtru vrlo visoke finoće pročišćivanja radi smanjenja trošenja servo-pumpa i kompletnog sustava. Nakon prolaska ulja kroz automatski filter jedan dio ide prema pumpama servo-ulja, a drugi dio prema pumpama kontrolnog ulja.

Kao i kod servo-ulja, radni tlak kontrolnog ulja je 200 bara a dobiva se od dvije električno pogonjene pumpe od kojih jedna radi, a druga je u pripravnosti. Svaka od njih ima zasebni regulacijski i prekotlačni ventil. Sustav kontrolnog ulja sadržava malu količinu fino filtriranog ulja koje služi kao radni medij za aktivaciju svih ventila u sustavu goriva te je bitno održavati tlak ulja konstantnim radi ostvarivanja što preciznijeg upravljanja ventilima.

Zajednička komora sustava smještena je ispod najviše platforme motora u razini glava cilindara i proteže se cijelom dužinom motora. Ovaj sustav sastoji se od odgovarajuće opreme i visokotlačnih cijevi za dobavu goriva, servo-ulja i kontrolnog ulja. Sustav uputnog zraka nije uključen u zajedničku komoru. Motorima koji imaju do osam cilindara zajednička je komora u jednom dijelu, a motorima s više od osam cilindara ona je podijeljena u dva dijela. Zajednička

komora goriva ima funkciju skladištenja određene količine goriva i dimenzionirana je tako da otklanja sva eventualna kolebanja tlaka u sustavu. Količine goriva koje visokotlačne pumpe isporučuju komori i sama veličina komore toliki su da nije moguć pad tlaka u sustavu nakon svakoga pojedinačnog uštrcavanja goriva.

Sustav zajedničkog voda konstruiran je s posebnom pozornošću na sigurnost i na trošenje materijala; tako su unutarnji otvori cijevi na kritičnim mjestima posebno oblikovani kako bi se naprezanje smanjilo na minimum.

Gorivo se iz zajedničke komore do rasprskavača dovodi kroz zasebnu jedinicu za kontrolu uštrcavanja (ICU - *Injection Control Unit*) za svaki cilindar. Jedinica za nadzor uštrcavanja precizno određuje vrijeme početka uštrcavanja i količinu goriva.

Jedinica za kontrolu uštrcavanja sastoji se od kontrolnog ventila za uštrcavanje i Sulzerova elektrohidrauličnog ventila za svaki cilindar. Elektrohidraulični ventil određuje početak i završetak uštrcavanja prema signalu dobivenome od WESCA (*Wartsila Engine Control Sistem*). Kontrolni ventili za uštrcavanje jednaki su i ventilima na klasičnim RTA motorima koji su upravljani visokim tlakom goriva. Svaki kontrolni ventil na svakom cilindru zasebno je reguliran preko kontrolne jedinice za uštrcavanje.

Za razliku od klasičnih Sulzerovih motora, kod kojima se ispušni ventili otvaraju hidrauličnim podizačem aktiviranim tlakom ulja a porast tlaka ulja ostvaruje se brijegom na razvodnoj osovinu i zatvaraju se stlačenim zrakom, Sulzerovim RT-flex motorima energija za otvaranje rabi se od tlaka servo-ulja, a na svakome cilindru nalazi se po jedan podizač ispušnog ventila. Fino filtrirano servo-ulje djeluje na unutarnji dio podizača koji je u slobodnom položaju i koji podiže ispušni ventil. Podizač ispušnog ventila je na vrhu opremljen dvama sensorima pozicije koji daju povratnu vezu s WESC sustavom nadzora rada.

Sustavom otvaranja i zavaranja upravlja jedinica za kontrolu uštrcavanja pa je na ovaj način postignuto iznimno precizno otvaranje i zatvaranje ispušnog ventila, što je znatno pridonijelo boljem procesu izgaranja goriva.

WECS je kompjutorizirani sustav regulacije rada motora posebno razvijen za dvotaktne Sulzerove brodske motore s tehnologijom zajedničkog voda.

Sustav regulira sljedeće funkcije motora:

- upućivanje, prekretanje i zaustavljanje motora,
- vrijeme uštrcavanja i vrijeme otvaranja ispušnih ventila,

- tlak goriva,
- tlak servo-ulja za otvaranje i zatvaranje ispušnih ventila,
- zalihost i funkcije nadzora.

WECS se sastoji od dva dijela: opće elektroničke jedinice (jedna po motoru) i cilindarskih elektroničkih jedinica (jedna za svaki cilindar).

Opća elektronička jedinica obavlja nadzor tlaka u zajedničkom cjevovodu, upravlja podizačima pumpa i obavlja komunikaciju s kontrolnom sobom. Opća kontrolna jedinica povezana je s cilindarskim kontrolnim jedinicama koje upravljaju podizačima pumpa servo-ulja, otvaranjem i zatvaranjem ispušnih ventila, reguliraju pilot-ventil uputnog zraka i reguliraju volumetrijsko uštrcavanje goriva.

## USPOREDBA SUSTAVA UMJESTO ZAKLJUČKA / *System Comparison Instead of a Conclusion*

Glavni cilj promjeni konvencionalnog sustava dobave goriva u elektronički upravljani jest poboljšati iskoristivost i osigurati što kvalitetniji rad brodske dizelske motora pri svim radnim režimima. To se postiglo boljom regulacijom trenutka i tlaka uštrcavanja goriva, ali i trenutka otvaranja i zatvaranja ispušnih ventila. Samim tim poboljšava se termodinamički proces izgaranja u motoru te se podiže iskoristivost motora. Posebno se poboljšava rad motora pri niskom opterećenju, poboljšava se ubrzavanje motora i smanjuju se štetni sastojci u ispušnim plinovima pri manjim opterećenjima motora.

Pri usporedbi elektronički upravljanih motora ME i konvencionalnih MC motora tvrtke MAN-B&W uočava se znatno poboljšanje u radu ME motora. Mogućnošću boljeg kontroliranja vremena uštrcavanja i mijenjanja omjera uštrcanoga goriva prema promjeni opterećenja, osigurava se stabilniji rad ME motora i pri 13 okretaja u minuti. Zbog takvih mogućnosti manevarske sposobnosti ME motora su poboljšane, što se ne može postići za konvencionalne MC motore.

Manja specifična potrošnja goriva ME motora postignuta je povišenjem maksimalnog tlaka izgaranja goriva u blizini gornje mrtve točke (GMT).

Kao posljedica manje potrošnje goriva, povećala se relativno emisija dušičnih oksida (NOx) kod ME motora koja je u granicama zahtjeva IMO standarda. Taj je problem ublažen s dva modela rada motora.

Ekonomski model rada motora ispunjava zahtjeve IMO standarda a rabi se u uvjetima normalne plovidbe

kad se ne postavljaju dodatni zahtjevi za smanjenje emisije NO<sub>x</sub>-a. Kad se postavljaju posebni uvjeti za smanjenje emisije NO<sub>x</sub>-a, kao pri uplovljavanju u luke, rabi se model niske emisije NO<sub>x</sub>. Ta dva modela rada motora ugrađena su u kontrolni sustav motora kao standardna mogućnost promjene iz jednoga modela rada u drugi. Promjene rada motora provode se dok je motor u pogonu uz pomoć elektroničke kontrole.

Vrlo bitan napredak je i bezdimni rad pri svim režimima rada motora. Postignuto je iznimno dobro izgaranje goriva osiguranjem optimalnog tlaka dobave goriva tijekom raznovrsnih radnih režima a k tome je postignuto i precizno reguliranje i upravljanje ispušnim ventilom.

Sustavom zajedničkog voda postignuta je mogućnost bezdimnog rada pri vrlo malim brzinama, kao što je 10%-tna nominalna brzina. To je vrlo važno za putničke brodove jer oni često plove uz obalu i kroz uske kanale.

## LITERATURA / References

1. Ž. Parat, *Brodski motori s unutarnjim izgaranjem*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2005.
2. L. Milić, *Brodski dizelski motori*, II, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik, 2003.
3. Podaci skinuti s interneta na stranicama:  
www.Marinediesels.co.uk  
MAN B&W, www.manbw.com  
WARTSILA, www.wartsila.com
4. Per Sorensen, MAN B&W Diesel A/S; Presentation of 7S50ME-C, 2003-02-19 in Frederikshavn

Rukopis primljen: 12. 6. 2008.

