

Andrzej KRUPA*

Silniki sterowane elektronicznie – zaawansowanie wdrożenia

W artykule przedstawiono koncepcję okrętowego dwusuwowego silnika MAN B&W Diesel bez wału rozrządu, sterowanego elektronicznie, pierwsze doświadczenia eksploatacyjne oraz zasady jego pracy.

Słowa kluczowe: silniki okrętowe, elektronicznie sterowany wtrysk paliwa, elektronicznie sterowany rozrząd

State of the Art of electronically controlled Engines

The paper presents technical concept of MAN B&W Diesel electronically controlled camshaft-less marine two-stroke diesel engine, its operating principles and first service experience.

Key words: ship engines, electronic controlled injection, electronic controlled valve lift and timing

Wstęp

W grudniu 2003 roku łączna moc zamówionych dwusuwowych wolnoobrotowych silników MAN B&W Diesel z rodziny MC osiągnęła historyczny poziom 100 GW. Od 1982 roku, to znaczy od czasu uruchomienia pierwszego silnika z rodziny MC, ponad 8000 silników zostało zamówionych lub dostarczonych do klientów na całym świecie. To wydarzenie wiąże się także z sukcesem wprowadzenia na rynek przez firmę MAN B&W Diesel dwusuwowych, wolnoobrotowych, sterowanych elektronicznie silników bez wału rozrządu. Zasluguje to na wzmiankę w historii tak, jak pierwszy silnik Rudolfa Diesla testowany w Augsburgu, pierwszy pełnomorski statek napędzany silnikiem Diesla, Selandia z 1912 roku, wprowadzenie w 1954 roku turbodoładowania do silników dwusuwowych czy pierwszy system SCR (selektywnej redukcji katalitycznej) zainstalowany na statku w 1989 roku.

Sterowanie elektroniczne powoli lecz w sposób ciągły opowiada świat żeglugi morskiej. Sterowanie z mostka, systemy alarmowe i regulatory od długiego czasu wykorzystują elektronikę. Elektronika na pokładach statków osiągnęła wysoki poziom i podobny proces dotyczy obecnie bezpośrednio silnika. Artykuł niniejszy opisuje zaawansowanie wdrożenia sterowania elektronicznego dwusuwowych okrętowych silników MAN B&W Diesel typu MC. Ich wersja elektroniczna została oznaczona jako silniki ME.

W silnikach ME elektronika jest wykorzystywana do kontroli procesu wtrysku, sterowania zaworem wylotowym i zintegrowanego procesu sterowania silnikiem. Poprawiono elastyczność pracy silnika, dając armatorowi wiele korzyści opisanych w artykule. Doświadczenia eksploatacyjne z pierwszych 17.000 godzin pracy silnika ME znalazły także swoje odzwierciedlenie w artykule. Koncepcja silnika i pozytywne doświadczenia eksploatacyjne zostały potwierdzone rosnącą liczbą zamówień na silniki ME.

Silniki ME

Firma MAN B&W przedstawiła propozycję handlową dotyczącą silników ME w 2002 roku. Silniki ME będą promowane równolegle z rodziną silników MC. Program produkcyjny silników pokazano na rys. 1. Oznaczenie „E” wskazuje, że silnik jest „Elektroniczny”, „Ekologiczny”, „Ekonomiczny”.

Silnik nawiązuje także do koncepcji silnika inteligentnego, wykorzystującego elektroniczny układ do sterowania hydraulicznie napędzanego systemu wtrysku paliwa i hydraulicznie napędzanego zaworu wylotowego. Energia uruchamiająca oba systemy pochodzi z napędzanego od silnika układu hydrau-

Introduction

In December 2003 MAN B&W Diesel A/S engine orders have reached the historical output figure of 100,000,000 kW with the company's range of low speed two-stroke MC engines. About 8,000 MC type engines have been ordered or delivered to customers all over the world since the first MC engine started in 1982. This historical milestone connects with the successful introduction of the MAN B&W Diesel A/S electronically controlled camshaft-less low speed diesel engines. It deserves a place in history like Rudolf Diesel's first engine in Augsburg, the 1912 motor vessel Selandia, the introduction of turbocharging on two-stroke diesels in 1954, and the first SCR (Selective Catalytic NO_x Reduction) system on ships in 1989.

Electronic control has slowly but steadily penetrated the maritime world. Bridge control, alarm system and governors have for a long time utilized electronics. Electronics onboard ships have matured and a similar development is now coming to the engine itself. This paper describes the state of the art of the electronic development of MAN B&W two-stroke MC type diesel engines, the electronic version of which are designated the ME engines.

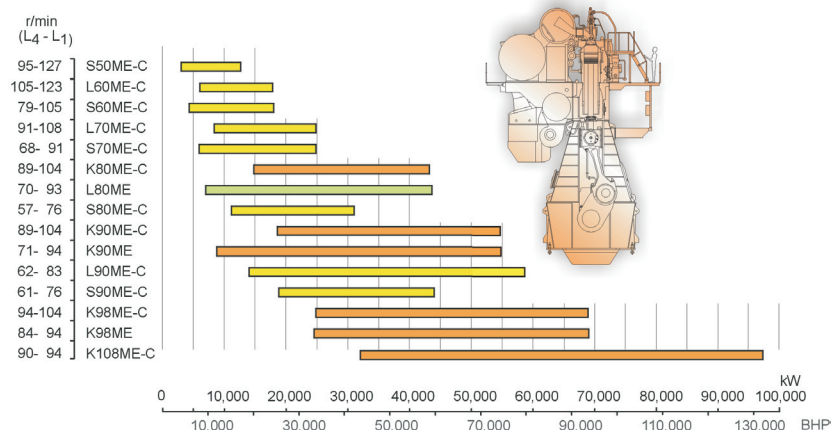
With the ME engines, electronics is now utilized to control the injection and exhaust valve and maneuvering system. The flexibility of the engine has been significantly improved, giving the shipowner a number of benefits as described in this paper. Service experience of the first 17,000 hours of the ME engine is being presented. The design and service experience has been acknowledged by growing order book for ME engines.

ME Engines

MAN B&W commercialized its so-called ME range of engines in 2002. The ME engines will be marketed in parallel with the Company's MC range. The engine program is shown in Fig. 1. The “E” in the name implies that these engines are “Electronic”, “Ecological” and “Economical”.

The engines, also referred to as Intelligent Engines, apply an electronic control system for their hydraulically operated fuel injection system and their hydraulically operated exhaust valve. The driving force comes from an engine driven common rail hydraulic oil loop with a pressure of about 200 bar, Fig. 2.

The fuel injection and exhaust valve activation are controlled by fast-acting high pressure valves referred to as Electronic Fuel Injection and Electronic Exhaust Valve Activation.



Rys. 1. Program produkcyjny silników ME sterowanych elektronicznie

Fig 1. The ME programme of electronically controlled engines

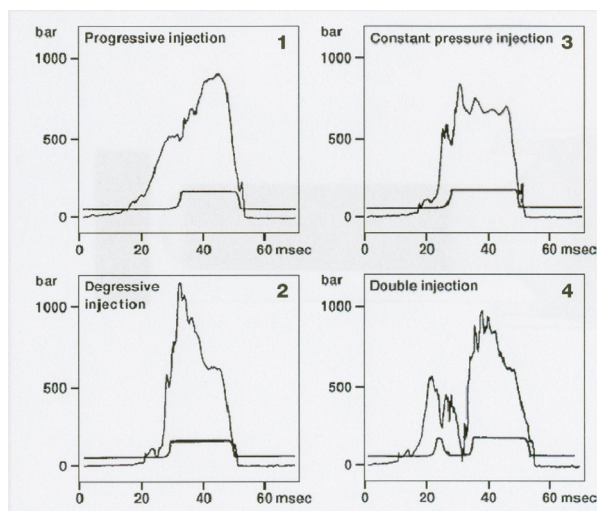
licznego rozprzeczającego wspólnym przewodem olej o ciśnieniu 200 bar (rys. 2).

Wtrysk paliwa i uruchomienie zaworu wylotowego są sterowane przez szybko działające, wysokociśnieniowe zawory nazwane odpowiednio *elektryczny wtrysk paliwa* i *elektryczne uruchamianie zaworu wylotowego*.

Jak można zauważyć na rys. 2, silniki serii ME nie posiadają wału rozrządu. W zamian dla doprowadzenia energii do wtrysku paliwa i podniesienia zaworu wylotowego wykorzystują system mechaniczno-elektryczny. Tradycyjny układ paliwa ciężkiego dla silnika jest pozostawiony tak, jak dla silników sterowanych mechanicznie. Zastosowano indywidualne tłoczkowe pompy wtryskowe z hydraulicznym napędem. Zabezpieczono układ hydrauliczny przed możliwością dostania się paliwa. Taki, bardzo elastyczny system pozwala modelować dowolny profil wtrysku (włączając w to uzyskiwany w systemie common rail) dla optymalnego jego dopasowania do stawianych wymagań pracy (rys. 3).

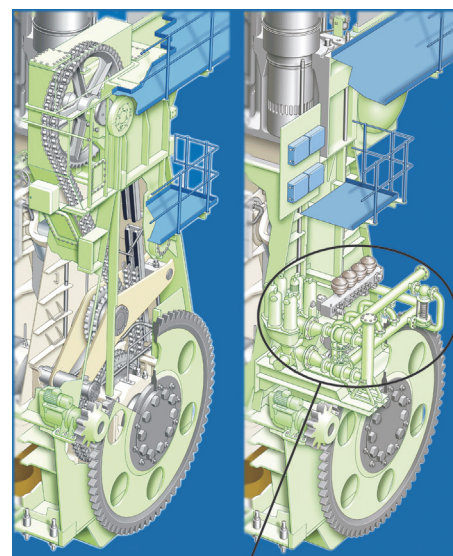
Korzyści wynikające z zastosowania silnika ME

Przewaga zastosowania silników z serii ME wynika z możliwości optymalnego doboru czasu, dawki i sposobu doprowadzenia dawki paliwa i czasu otwarcia zaworu wylotowego



Rys. 3. Profile wtrysku paliwa

Fig 3. Fuel injection rate shaping



Hydraulic Power Supply

Rys. 2. Silnik ME z hydraulicznym układem zasilania w porównaniu z układem klasycznym

Fig 2. Fuel pump and exhaust valve arrangement on the ME engine vs. classical construction

Hence, as seen in Fig. 2, the ME series of engines have no camshaft. Instead, to provide power for fuel injection and exhaust valve lifting, they utilize a mechatronic system. The loop for heavy fuel oil is retained, as on mechanically controlled engines, i.e. individual plunger type fuel pumps with hydraulic activation are used. Hence, no fuel oil will enter the hydraulic loop. This very flexible system makes it possible to model any injection pattern (including the one used in common rail systems) for optimum rate shaping, Fig. 3.

Benefits of the ME Engine

The advantages of the ME series of engines come from the fact that the timing and intensity of fuel oil injection and exhaust valve timing are kept optimal at all steady as well as transient conditions. This give lower fuel oil consumption and lower exhaust gas emissions.

The main development goals are enhanced reliability and operational flexibility, reduced operational costs and simplicity. In summary, the advantages of the ME engine are:

- well-proven traditional fuel injection pattern, Fig. 3, picture 1, and technology with increased fuel injection rate; all the knowledge and experience gained over many years on traditional engines can therefore be transferred to the ME engine,
- high injection pressure also at low load, Fig. 4,
- variable electronically controlled timing of fuel injection and exhaust valve opening, for lower SFOC and better performance parameters,
- slide-type fuel valves with zero sac volume, reducing fuel consumption and particle emission, Fig. 5,
- control system offering timing that is more precise, and thereby providing better engine balance and equalised thermal load in and between cylinders. Uniform combustion and heat load over the whole load spectrum. All minimise the risk of premature need for overhaul, and thus extend the lifetime of combustion chamber components,

dla stabilnych i zmiennych warunków pracy silnika. Pociąga to za sobą obniżenie zużycia paliwa i obniża emisję szkodliwych związków.

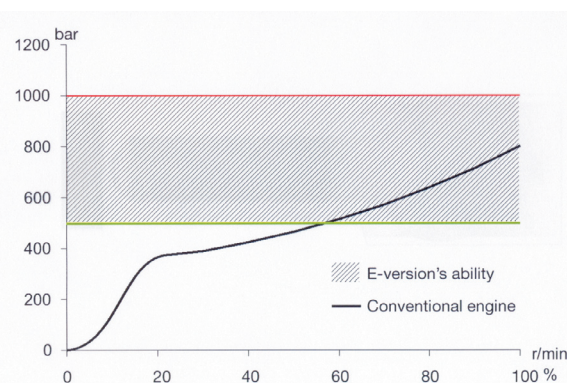
Głównym celem rozwoju nowej konstrukcji było podniesienie pewności i elastyczności pracy silnika, zredukowanie kosztów obsługi oraz jej uproszczenie. Korzyści wynikające z zastosowania silnika ME są następujące:

- wykorzystanie potwierdzonego w praktyce, tradycyjnego profilu wtrysku, rys. 3, wykres 1, z rosnącą dawką paliwa w czasie wtrysku; wiedza i doświadczenie zebrane przez wiele lat eksploatacji silników sterowanych mechanicznie może więc być przeniesiona na silniki z rodziny ME,
- wysokie ciśnienie wtrysku także dla obciążeń częściowych, rys. 4,
- zmienne, elektroniczne sterowanie czasem wtrysku paliwa i czasem otwarcia zaworu wylotowego prowadzi do uzyskania niższego zużycia paliwa i lepszych parametrów pracy silnika,
- końcówka wtryskiwacza typu *Slide* z zerową objętością części wylotowej (tzw. bezstudzienkowa), redukująca zużycie paliwa i emisję cząstek stałych, rys. 5,
- system sterowania czasem wtrysku paliwa i czasem otwarcia zaworu wylotowego jest bardziej dokładny, zapewnia lepsze wyrównanie silnika i wyrównanie obciążeń cieplnych w cylindrach i pomiędzy nimi; proces spalania w cylindrach jest bardzo podobny; wszystko to minimalizuje ryzyko przedwczesnej potrzeby przeglądu i przedłuża żywotność elementów komory spalania,
- znacząca poprawa pracy przy bardzo małych prędkościach obrotowych ze stabilnym ich utrzymaniem,
- szybsze uzyskiwanie znamionowej prędkości obrotowej (dobra akceptacja wzrostu obciążenia) silnika poprzez modyfikację czasu otwarcia zaworu wylotowego co powoduje dostarczenie większej ilości energii do turbosprężarki,
- lepsza nawrotność silnika i awaryjne zatrzymanie statku ze względu na optymalizację czasu otwarcia zaworu i czasu wtrysku paliwa w czasie trwania tych procesów,
- lepsze charakterystyki emisji zanieczyszczeń, mniejsza emisja NO_x i mniejsze dymienie silnika,
- oprogramowanie sterowania może być uaktualnione, gdy zostaną wprowadzone nowe przepisy dotyczące ochrony środowiska lub gdy zostanie osiągnięty postęp w dziedzinie poznania procesów spalania; w rezultacie, silnik pozostanie nowoczesny przez długi okres czasu,
- usunięcie części mechanicznych i zastąpienie ich blokami sterowania elektronicznego, wszystkich tego samego typu; oznacza uproszczenie urządzenia,
- każdy element elektroniczny, jeżeli jest taka potrzeba, może być wymieniony bez zatrzymywania silnika, który automatycznie powróci do normalnej pracy po wymianie uszkodzonego elementu. Taki system nazywa się *plug and play*.

Zasady pracy silnika ME

W dwusuwowym konwencjonalnym silniku typu MC wał rozrządu mechanicznie uruchamia pompę wtryskową paliwa i mechanizm otwarcia zaworu wylotowego. W działaniu, to mechaniczne związanie limituje elastyczność sterowania.

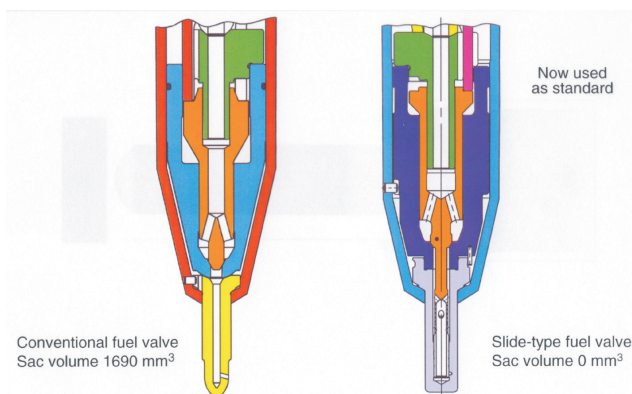
Silnik ME jest wyposażony w oddzielne urządzenia mechaniczno-hydrauliczne współpracujące z elektronicznymi blo-



Rys. 4. Charakterystyka prędkościowa ciśnienia wtrysku

Fig 4. Fuel injection pressure

- significantly improved dead slow running with low and stable minimum rpm,
- faster acceleration (good load acceptance) of the engine by modifying the exhaust valve timing, thereby supplying more energy to the turbocharger,
- better astern and crash stop performance due to the optimised exhaust valve and injection timing,
- improved emission characteristics, lower NO_x and smokeless operation,
- the control software can be upgraded if new environmental regulations come into force and when new knowledge regarding combustion is achieved; the engine consequently remains up-to-date for a longer period of time,
- removing mechanical components and replacing them with electronic control units, all of which are of the same execution, means increased simplicity,
- any electronic part can, if necessary, be replaced without stopping the engine, which will automatically revert to normal operation after replacement of a defective unit; this is commonly referred to as a *plug and play* system.



Rys. 5. Wtryskiwacz suwakowy w porównaniu z konwencjonalnym studzienkowym

Fig. 5. Fuel injection valves, slide-type compared to conventional sac-type

Operating Principle of the ME Engine

In a conventional two-stroke MC diesel engine, the camshaft mechanically controls the fuel injection and the exhaust valve operation. In operation, this mechanical linkage limits timing flexibility.

kami i oprogramowaniem. Dla nazwania tych elementów wprowadzono nową terminologię, która jest zastosowana i wyjaśniona poniżej. Wprowadzenie elektronicznej kontroli procesu wtrysku i otwarcia zaworu wylotowego pozwala na indywidualną i ciągłą regulację parametrów pracy każdego cylindra podczas pracy silnika. Różnice pomiędzy silnikiem typu MC i ME to:

- napęd łańcuchowy wału rozrządu,
- wał rozrządu z krzywkami paliwowymi i krzywkami zaworów wylotowych,
- mechanizm napędu pompy wtryskowej,
- konwencjonalne pompy wtryskowe,
- mechaniczny napęd zaworów wylotowych i prowadnic rolek,
- rozdzielacz powietrza rozruchowego napędzany od silnika,
- regulator elektroniczny z aktuatorem (urządzeniem wykonawczym),
- wałek regulacyjny,
- pulpit sterujący silnikiem,
- mechaniczne pompy dla oleju smarującego cylindry.

System sterowania silnika (rys. 6) jest przystosowany do standardowego układu zdalnego sterowania i posiada połączenie do układu sterowania z mostka, pulpitu sterowania w CMK i lokalnego stanowiska sterowania. Lokalne, awaryjne, stanowisko sterowania może być umieszczone w dowolnym miejscu w siłowni lub na silniku i zastępuje tradycyjną konsolę sterowania umieszczoną na silniku typu MC.

Cele projektu w postaci zwiększonej pewności pracy silnika, zmniejszenia kosztów eksploatacyjnych i uproszczenia konstrukcji osiągnięto poprzez uzyskanie wysokiego stopnia niezawodności połączonego z uproszczonymi naprawami, tak jak to opisano poniżej.

Centrala manewrowo-kontrolna. W centrali manewrowo-kontrolnej umieszczone są dwa komputery klasy PC. Jeden jest zainstalowany w głównym pulpicie sterowania. Pozwala on obsłudze statku przekazywać komendy sterowania, regulować parametry pracy silnika, wybierać rodzaj pracy, obserwować status systemu sterowania itd. Drugi jest komputerem administracyjnym i służy jako zabezpieczenie dla głównego komputera i obsługuje system CoCoS (*Computer Controlled Surveillance*) w przypadku jego zainstalowania.

Jednostka kontroli silnika. Dla pewności pracy w skład systemu kontroli wchodzi dwie jednostki kontroli silnika pracujące równolegle i wykonujące te same działania. Dublują się wzajemnie i jeden jest w „gorącej rezerwie” dla drugiego. Jeżeli ulegnie uszkodzeniu działająca jednostka kontroli silnika, druga będąca w „gorącej rezerwie” przejmuje działanie bez jakiegokolwiek przerwy w ciągłości sygnału sterowania.

Jednostka kontroli silnika wykonuje następujące działania:

- funkcje regulatora prędkości obrotowej, rozkazy start/stop, określenie czasu i rodzaju wtrysku paliwa, określenie czasu otwarcia zaworu wylotowego, określenie czasu otwarcia zaworów rozruchowych, itp,
- ciągła kontrola pracy funkcji pomocniczych sterowanych przez jednostki kontroli urządzeń pomocniczych,
- połączenie do systemu monitoringu i bezpieczeństwa,
- połączenie do systemu lubrykatorów *alpha*,
- alternatywne rodzaje pracy.

The ME engine is equipped with distinct hydraulic-mechanical equipment and its associated electronic hardware and software. For these parts, a new terminology has been introduced, which is explained and used in the following. The introduction of electronically controlled fuel injection and exhaust valve actuation permits individual and continuous adjustment of the timing for each cylinder while the engine is running. The differences between the MC and ME engines are:

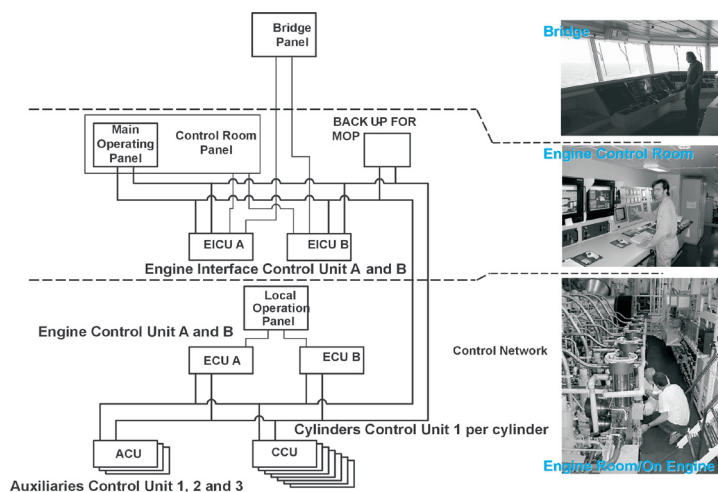
- chain drive for camshaft,
- camshaft with fuel cams and exhaust cams,
- fuel pump actuating gear,
- conventional fuel injection pump,
- exhaust valve actuating gear and roller guides,
- engine driven starting air distributor,
- electronic governor with actuator,
- regulating shaft,
- engine side control console,
- mechanical cylinder lubricators.

The Engine Control System (Fig. 6), is prepared for normal remote control, having an interface to the Bridge Control System, the Engine Room Control console and the Local Operating Panel. The latter can be placed anywhere in the engine room or on the engine, replacing the Engine-Side Control console of the MC engines.

The development goals of enhanced reliability, reduced operational costs and simplicity are achieved by a high degree of redundancy combined with simplified maintenance, as described in the following.

Engine Control Room. In the Engine Control Room, two Personal Computers (PC's) are located. One is located in the Main Operating Panel, i.e. a PC that allows the engineer to carry out all engine commands, adjust the engine parameters, select the running modes, and observe the status of the control system, etc. The other is an administration PC, also located in the Engine Control Room, to serve as back up for the operational PC and to run the CoCoS (Computer Controlled Surveillance) system, if installed.

Engine Control Unit. For redundancy purposes, the control system comprises two Engine Control Units operating in parallel and performing the same task. As they are duplicates of each other, the one serves as a hot stand-by for the other. If



Rys. 6. System sterowania silnika ME

Fig. 6. ME Engine Control System

Jednostka kontroli połączeń silnika. *Jednostka kontroli połączeń silnika* działa jako połączenie pomiędzy: *systemem sterowania z mostka* i panelem sterowania w *centrali manewrowo-kontrolnej*. Dwie niezależne *jednostki kontroli połączeń silnika* działają równolegle.

Jednostka kontroli urządzeń pomocniczych. W normalnym stanie pracy sterowanie urządzeniami pomocniczymi jest podzielone pomiędzy trzy jednostki. W przypadku awarii jednej jednostki jest wystarczające zabezpieczenie dla zapewnienia ciągłej pracy silnika.

Jednostki kontroli urządzeń pomocniczych prowadzą nadzór nad startem/stopem dmuchaw pomocniczych, kontrolują elektryczne i napędzane od wału korbowego silnika pompy olejowe *hydraulicznego układu zasilania*, itd.

Jednostka kontroli cylindra. System kontroli silnika zawiera jedną *jednostkę kontroli cylindra* na każdy cylinder silnika. *Jednostka kontroli cylindra* kontroluje *elektryczny wtrysk paliwa*, *elektryczne uruchamianie zaworu wylotowego* i *zawór powietrza rozruchowego* zgodnie z poleceniami od *jednostki kontroli silnika*.

Wszystkie *jednostki kontroli cylindra* są identyczne i w przypadku uszkodzenia *jednostki kontroli cylindra* jednego cylindra, tylko ten cylinder będzie wyłączony z działania.

Należy zwrócić uwagę, że każda jednostka kontroli może być wymieniona bez zatrzymywania silnika, który wraca do normalnego stanu pracy natychmiast po wymianie uszkodzonej jednostki.

Hydrauliczna jednostka cylindra. *Hydrauliczna jednostka cylindra*, jedna na cylinder, składa się z bloku podstawy, na którym zamontowany jest blok rozdzielacza. Blok rozdzielacza połączony jest z kilkoma akumulatorami dla zabezpieczenia odpowiedniego dopływu oleju w momencie poboru przez *elektryczny wtrysk paliwa* i *elektryczne uruchamianie zaworu wylotowego* (rys. 7).

Blok rozdzielacza służy jako podstawa dla hydraulicznie uruchamianej pompy wtryskowej paliwa i hydraulicznie napędzanego urządzenia do otwierania zaworu wylotowego.

Proporcjonalny zawór szybkiego działania (zawór *elektrycznego wtrysku paliwa*) steruje ruchem tłoka pary precyzyjnej pompy wtryskowej, podczas gdy *elektryczny zawór „włącz / wyłącz”* (zawór *elektrycznego uruchomienia zaworu wylotowego*) steruje serwo-tłokiem pompy urządzenia otwierającego zawór.

Hydrauliczny układ zasilania. Zadaniem *hydraulicznego układu zasilania* jest dostarczenie wymaganej ilości oleju hydraulicznego o wymaganym ciśnieniu 200 bar do *elektrycznego wtrysku paliwa* i *elektrycznego uruchamiania zaworu wylotowego*, podczas uruchamiania silnika i w czasie normalnej pracy. Olej do systemu hydraulicznego pobierany jest z głównego systemu smarowania silnika. System pokazano na rys. 2 i rys. 8.

W skład *hydraulicznego układu zasilania* wchodzi:

- jeden filtr automatyczny i filtr zapasowy,
- dwie pompy napędzane elektrycznie,
- trzy pompy napędzane przez silnik,
- blok akumulatorów olejowych.

Układ wielu pomp z pompami rezerwowymi zapewnia zabezpieczenie jeśli chodzi o dostarczanie energii hydraulicznej. Pompy hydrauliczne podzielone są na trzy grupy, każda grupa

the active Engine Control Unit fails, the stand-by unit will take over the control without any interruption.

The Engine Control Units perform such tasks as:

- speed governor functions, start/stop sequences, timing of fuel injection, timing of exhaust valve activation, timing of starting valves, etc.,
- continuous running control of auxiliary functions handled by the Auxiliary equipment Control Units,
- interface to monitoring and safety systems,
- interface to Alpha Lubricator system,
- alternative running modes and functions.

Engine Interface Control Unit. The Engine Interface Control Units perform such tasks as interface with the outer control stations: Bridge Control System, and Engine Room Control console. The two redundant Engine Interface Control Units operate in parallel.

Auxiliary equipment Control Unit. Normally, the control of the auxiliary equipment is divided among three Auxiliary Control Units so that, in the event of a failure of one unit, there is sufficient redundancy to permit continuous operation of the engine.

The Auxiliary Control Units perform the control, starting/stopping of the auxiliary blowers, the control of the electrical and engine driven control oil pumps of the Hydraulic Power Supply unit, etc.

Cylinder Control Unit. The control system includes one Cylinder Control Unit per cylinder. The Cylinder Control Unit controls the Electronic Fuel Injection, the Electronic exhaust Valve Activation and the Starting Air Valve, in accordance with the commands received from the Engine Control Unit.

All the Cylinder Control Units are identical, and in the event of failure of the Cylinder Control Unit for one cylinder, only this cylinder will automatically be cut out of operation.

It should be noted that any individual electronic unit can be replaced without stopping the engine, which will revert to normal operation immediately after replacement of the defective unit.

Hydraulic Cylinder Unit. The Hydraulic Cylinder Unit, one per cylinder, consists of a support console on which a distributor block is mounted. The distributor block is fitted with a number of accumulators to ensure that an adequate hydraulic control oil peak flow is available for the Electronic Fuel Injection and the Electronic exhaust Valve Activation systems, see Fig. 7.

The distributor block serves as a mechanical support for the hydraulically activated fuel injection pump and the hydraulically activated exhaust valve actuator.

A fast-acting proportional valve (the Electronic Fuel Injection valve) controls the movement of the fuel injection pump plunger, whereas an electronic on/off valve (the Electronic exhaust Valve Activation valve) controls the servo piston of the exhaust valve actuator pump.

Hydraulic Power Supply. The purpose of the Hydraulic Power Supply is to deliver the necessary high-pressure control oil flow to the Electronic Fuel Injection and the Electronic exhaust Valve Activation at the required 200 bar, during start-up as well as in normal service. The control oil is taken from the main lubricating oil system of the engine. The system is shown in Fig. 2 and Fig. 8.

The Hydraulic Power Supply unit consists of:

sterowana jest przez osobną *jednostkę kontroli urządzeń pomocniczych*. Przewody wysokiego ciśnienia pomiędzy *hydraulicznym układem zasilania* a *hydrauliczną jednostką cylindra* posiadają podwójne ścianki i czujnik przecieków. Dopuszczalna jest awaryjna praca układu, gdy ciśnienie oleju hydraulicznego oddziałuje na zewnętrzne ścianki podwójnego przewodu. Wielkość i wydajność *hydraulicznego układu zasilania* zależna jest od typu silnika.

Lubrykatory alpha. Sterowane elektronicznie *lubrykatory alpha* oleju cylindrowego, oferowane jako opcja dla silników z rodziny MC, są standardem dla silników ME, łącznie z systemem sterowania.

Zawory powietrza rozruchowego. Konwencjonalny dystrybutor powietrza rozruchowego silnika MC został zastąpiony przez jeden zawór elektromagnetyczny na cylinder, sterowany przez *jednostkę kontroli cylindra systemu kontroli silnika*.

Powolny obrót wału korbowego przed uruchomieniem silnika jest programowo włączony w *system kontroli silnika*.

Pewność pracy systemu kontroli silnika. Dla zabezpieczenia pracy silnika w przypadku odesobnionej awarii wprowadzono poniższe zabezpieczenia konstrukcyjne:

- zdwojono *jednostkę kontroli połączeń silnika*,
- zdwojono *jednostkę kontroli silnika*,
- uszkodzenie jednej *jednostki kontroli cylindra* nie zatrzymuje silnika,
- zdwojono sieć komunikacji,
- zdwojono *hydrauliczny układ zasilania*,
- zdwojono czujniki,
- zastosowano podwójne ścianki przewodów wysokociśnieniowych,
- zdwojono system zasilania elektrycznego.

Zasilanie elektryczne jest połączone do dwóch niezależnych źródeł energii z osobnymi zabezpieczeniami.

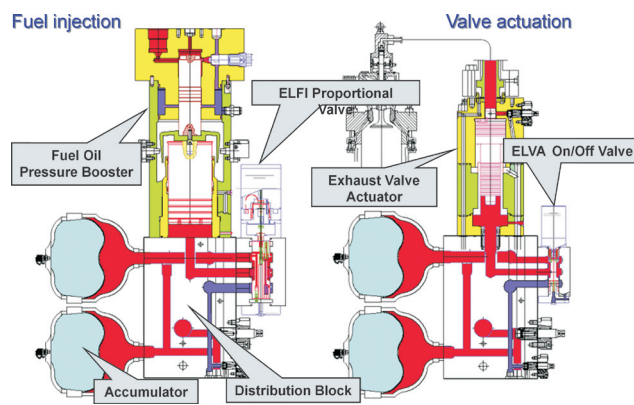
Panel sterowania miejscowego. Silnik jest normalnie sterowany z mostka lub z *centrali manewrowo-kontrolnej*.

Alternatywnie może być uruchomiony *panel sterowania miejscowego*. Może on być uważany za równoważny *stanowisku miejscowego sterowania* montowanemu bezpośrednio na silniku typu MC.

W wersji elektronicznej stanowisko może być umieszczone w dowolnym miejscu w siłowni, w osobnym pomieszczeniu sterowania lub bezpośrednio na silniku.

Panel sterowania miejscowego zapewnia dostęp do wszystkich podstawowych funkcji sterowania takich jak: uruchomienie silnika, kontrola prędkości obrotowej, zatrzymanie, nawrót. Na panelu wyświetlane są najważniejsze dane dotyczące pracy silnika.

Blok elektroniczny. W skład systemu kontroli silnika wchodzi elektroniczne jednostki kontroli jak to opisano



Rys. 7. Hydrauliczna jednostka cylindra

Fig. 7. Hydraulic cylinder unit

- one automatic filter and an emergency filter,
- two electrically driven pumps,
- three engine driven pumps,
- one accumulator block.

The multiple pump configurations with standby pumps ensure redundancy with regard to the hydraulic power supply. The electrical pumps are divided into three groups, each controlled by an Auxiliary Control Unit. The high-pressure pipes between the Hydraulic Power Supply and the Hydraulic Cylinder Unit are of the double-walled type, having a leak detector. Emergency running is possible using the outer pipe as pressure containment for the high-pressure oil supply. The sizes and capacities of the Hydraulic Power Supply depend on the engine type.

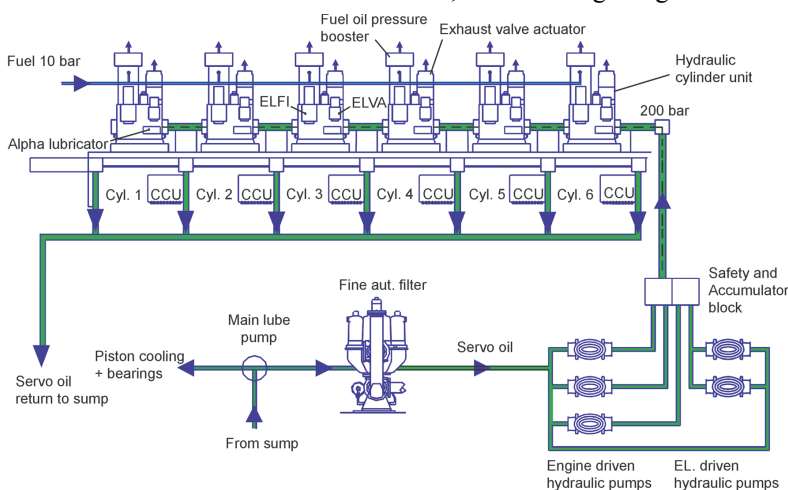
Alpha Lubricator. The electronically controlled Alpha cylinder lubricating oil system, available as an option for the MC engines, is applied as standard on the ME engines, including the control system.

Starting Air Valves. The conventional starting air distributor of the MC engines has been replaced by one solenoid valve per cylinder, controlled by the Cylinder Control Units of the Engine Control System.

Slow turning before starting is a program incorporated into the basic Engine Control System.

Redundancy in the Engine Control System. To ensure that the engine will continue running in the event of a single failure, the following safeguards are incorporated in the design:

- redundant Engine Interface Control Units,
- redundant Engine Control Units,
- failure of one Cylinder Control Unit does not stop the engine,
- double communication network,
- redundant Hydraulic Power Supply,
- sensors are duplicated,
- redundant high pressure piping system,
- redundant electrical power supply.



Rys. 8. Silnik ME, obieg oleju hydraulicznego

Fig. 8. ME Engine Hydraulic Oil Loop

powyżej. Jednostki te zbudowane są na bazie takiego samego urządzenia komputerowego zwanego *wielofunkcyjną jednostką kontroli*. Jest to komputer klasy PC skonstruowany do zamontowania w skrzynce podłączeniowej do montażu bezpośrednio na silniku dla uproszczenia instalacji.

System kontroli prędkości obrotowej. *System kontroli prędkości obrotowej* jest niezbędnym elementem systemu kontroli silnika, odpowiedzialnym za dostarczenie sygnału określającego prędkość obrotową i położenie kątowe wału korbowego. Uzyskuje się to poprzez generowanie ciągu impulsów i ich zliczaniu. Położenie początkowe oznaczone jest specjalnym impulsem. Dla określenia kierunku obrotów zastosowano drugi ciąg impulsów a dla uruchomienia systemu dodatkowy specjalny impuls początkowy.

Dla bezpieczeństwa system kontroli prędkości obrotowej jest zdublowany, co w sumie powoduje zainstalowanie aż ośmiu czujników.

Doświadczenia eksploatacyjne z silnikami typu ME

Zdecydowano, że pełne długotrwałe badania w warunkach rzeczywistych muszą być przeprowadzone po zakończeniu prac rozwojowych koncepcji silnika ME i badaniach jego zachowania w centrum badawczo-rozwojowym w Kopenhadze.

Do tego celu, w kooperacji z norweskim armatorem Odfjell, wybrano silnik 6L60MC zbudowany przez Hitachi i zainstalowany na statku do przewozu chemikali M/T Bow Cecil, zbudowanym w Norwegii w 1995 roku. Na silniku zainstalowano sterowanie elektroniczne.

Do chwili przygotowywania artykułu silnik przepracował 17.000 godzin jako silnik sterowany elektronicznie po zainstalowaniu systemu pod koniec 2000 roku i jego uruchomieniu do pracy na początku roku 2001.

Zachowanie się silnika 6L60ME można uznać za bardzo satysfakcjonujące. Elektroniczne urządzenia silnika są łatwe do ustawienia zalecanych parametrów pracy i były w stanie utrzymywać bardzo dobre parametry pracy bez dalszych regulacji przez cały okres testu. Średnie i maksymalne ciśnienie spalania jest bardziej wyrównane dla cylindrów niż w silniku sterowanym mechanicznie. W trudnych warunkach pogodowych obserwuje się mniejszą zmienność prędkości obrotowej silnika. Silnik pracował bez przypadków niepracującego cylindra.

Pomiary zużycia paliwa potwierdziły przewidywania. Test wykazał obniżenie emisji szkodliwych produktów spalania. Wielkość zadymienia spalin według skali Boscha została znacząco zredukowana w wyniku zastosowania elektronicznie sterowanego wtrysku i wtryskiwaczy typu *Slide*. Potwierdzona została znacząca poprawa działania silnika przy minimalnej prędkości obrotowej. Silnik może stabilnie pracować przy 10-12% nominalnej prędkości obrotowej.

Medium przenoszącym energię do uruchomienia pompy wtryskowej paliwa i urządzenia do otwierania zaworu wylotowego jest przefiltrowany olej z systemu smarowania silnika. Pozwoliło to uniknąć instalowania osobnego systemu oleju hydraulicznego ze zbiornikiem, pompami, chłodnicami itp. System hydrauliczny wykorzystuje olej smarujący o podniesionym do 160-250 bar ciśnieniu pracy. Zasadniczym czynnikiem zapewniającym długą trwałość i niezawodność systemu hydraulicznego jest czystość oleju. Wymagania dotyczące oleju

Electrical power is supplied from two power supply units having separate fuses to protect the individual unit.

Local Control Panel. The engine is normally controlled either from the bridge or from the engine control room.

Alternatively, the Local Control Panel can be activated. This back-up control is to be considered as a substitute for the Engine-Side Control console mounted directly on the MC engine.

In this electronic version, the unit can be located in the most convenient position in the engine room, in a separate control room, or on the engine itself.

From the Local Control Panel, all the basic functions are available, such as starting, engine speed control, stopping, reversing, and the most important engine data are displayed.

The Electronic Controller. The engine control system consists of a number of dedicated control units, as mentioned above. These control units are built onto the same computer hardware platform called a Multi-Purpose Controller. This is a PLC-like computer designed to be mounted in a junction box directly on the engine to simplify installation.

Tacho System. The Tacho system is an indispensable part of the control system, responsible for the delivery of signals for determining the speed and angular position of the crankshaft. This is done by generating a pulse train and counting the pulses for the position. A marker pulse finds the initial position. To be able to detect the direction, a second pulse train is added and, for start-up, a second marker signal.

For redundancy, this system is duplicated so that there are a total of eight sensors.

Service Experience with the ME Engines

It was decided that a full-scale long-term service test was to take place after finishing the development of the ME engine and the testing of its features at our R&D centre in Copenhagen.

In cooperation with the Norwegian owner Odfjell, a 6L60MC engine originally built by Hitachi and installed on a chemical carrier, the M/T Bow Cecil, built in Norway in 1995, was selected and rebuilt for electronic control.

At the time of writing, the engine has logged more than 17,000 hrs in the electronic mode after installation and tests in 2000 and operation start in 2001.

The overall performance of the 6L60ME engine is very satisfactory. The electronic features of the engine are very easy to adjust to the prescribed set values, and it was able to keep these very satisfactory values without further adjustments throughout the entire test period. The mean and maximum pressures of the engine are better balanced than on conventional mechanically controlled engines. In rough weather, there is less fluctuation in engine rpm compared with traditional mechanically controlled engine. The engine has been running without any misfiring.

Measurement of the fuel consumption confirmed expectations. The test confirmed reduced emissions. The Bosch number is significantly reduced as a result of the electronic injection and the use of slide-type fuel valves. Significant improvement has been confirmed for dead slow performance. The engine can run stable at 10-12% of the MCR level.

smarującego silnika nie są tak wysokie jak dla systemu hydraulicznego. Olej do systemu hydraulicznego wymaga więc dodatkowej filtracji. Nie zaobserwowano zjawiska blokowania dodatkowych filtrów oleju.

W ten sposób zostało potwierdzone, że cele projektu narysowane przez MAN B&W, a polegające na zwiększeniu niezawodności pracy, elastyczności działania, zmniejszeniu kosztów eksploatacyjnych i uproszczeniu budowy silnika zostały osiągnięte.

Założa jest przekonana co do niezawodności pracy systemu ME i nie uznaje go za bardziej skomplikowany od tradycyjnego sterowania mechanicznego. Wprost przeciwnie, łatwiej jest uregulować średnie i maksymalne ciśnienie pracy silnika.

Armator, który jako pierwszy na świecie posiada rzeczywiste doświadczenia eksploatacyjne, zademonstrował swoje zaufanie do systemu zamawiając następny statek tej samej klasy z silnikiem 7S50ME-C. Silnik ten został zbudowany i przetestowany we Frederikshavn (Dania) na przełomie stycznia i lutego 2003 r. Oficjalna prezentacja silnika miała miejsce 19 lutego 2003 r. Był to pierwszy silnik typu ME.

Wnioski

Prezentacja silnika ME we Frederikshavn otworzyła nowy rozdział w zastosowaniu elektroniki do sterowania silników Diesla. Rozwinięta przez MAN B&W technologia zawierająca zarówno urządzenia komputerowe jak i oprogramowanie zaowocowała powstaniem zintegrowanego systemu kontroli silnika. Elastyczność systemu uzyskano dzięki możliwości stosowania różnych trybów pracy, które mogą być wybierane automatycznie, dla zabezpieczenia potrzeb warunków pracy lub przez operatora dla uzyskania konkretnych celów eksploatacyjnych takich jak: niskie zużycie paliwa lub ograniczona emisja szkodliwych produktów spalania.

Silniki typu ME zostały zaakceptowane przez środowisko i rynek żeglugowy. Lista zamówień silników ME zawiera silniki o średnicach cylindra 50, 60, 70, 90 i 98 cm. W momencie przygotowywania artykułu MAN B&W posiadał zamówienia na 62 silniki tego typu do dostarczenia przez licencjodawców na całym świecie. Dwa handlowe silniki ME, oprócz silnika ze statku M/T Bow Cecil - 6L60MC, 7S50ME-C i 6S70ME-C znajdują się obecnie w eksploatacji.

Artykuł recenzowany

Skróty i oznaczenia/Nomenclature

Accumulator – akumulator

Auxiliaries control unit – jednostka sterująca urządzeniami pomocniczymi

Control network – sieć połączeń sterujących

Cylinder control unit – jednostka sterująca cylindrem

Degressive injection – wtrysk zmniejszający się

Distribution block – układ rozdzielacza

Double injection – wtrysk podwójny

ELVA – zawór elektronicznego uruchomienia zaworu wylotowego

ELFI – zawór elektronicznego wtrysku paliwa

Engine interface control unit – układ połączeń jednostki sterującej z silnikiem

Exhaust valve actuator – element wykonawczy zaworu wylotowego

E-version ability – dostępność w silniku ME

Fuel injection – wtrysk paliwa

Fuel oil pressure booster – sprężarka paliwa

Hydraulic power supply – zasilanie hydrauliczne

The power medium employed for operating the fuel injection pumps and the exhaust valves is fine-filtered system oil from the engine, thus avoiding a separate hydraulic oil system with tanks, pumps, coolers, etc. The driving system utilises lube oil at a moderate working pressure (160 -250 bar), but even so, it is essential, for ensuring a long lifetime of such hydraulic systems, that the oil is clean. However, the requirements for the engine system oil are not that strict - nor are they needed for the engine itself; therefore, the oil requires extra filtration. There was no clogging of filters.

It has therefore been confirmed that MAN B&W development goals of enhanced reliability and operational flexibility, reduced operational costs and simplicity have been achieved.

The crew feel confident with the reliability of the ME system, and they do not find it more complicated than a conventional system. It is easier to adjust mean and maximum pressures.

The owner, being the first in the world with real hands-on service experience, has demonstrated his confidence in the system by ordering one more vessel of the same class with a 7S50ME-C engine. This engine was tested at Frederikshavn, Denmark in January/February 2003, and the official presentation took place on 19 February 2003. It was first commercial ME Engine.

Conclusion

The ME presentation at Frederikshavn has opened a new chapter in electronics for diesel engines. The in-house development of both the hardware and the software has resulted in an integrated solution for the Engine Control System. System flexibility is obtained by means of the different running modes, which are selected either automatically, to suit specific operating conditions, or manually by the operator, in order to meet specific operating goals, such as low fuel oil consumption or limited exhaust gas emission.

The ME engine has been accepted by the market. The company portfolio, or order book, of ME engines includes the 50, 60, 70, 90 and 98 cm bore versions of the ME engine. At the time of writing, 62 engines are on order at our licensees worldwide. The two commercial ME engines, beside M/T Bow Cecil's 6L60MC, 7S50ME-C and 6S70ME-C are in service at the time of writing.

Main operating panel – główny panel sterujący

Piston cooling – chłodzenie tłoka

Progressive injection – wtrysk progresywny

Sac volume – objętość studzienki rozpylacza

Safety block – układ bezpieczeństwa

Servo oil – wspomaganie olejowe

Valve actuation – siłownik zaworowy

* Mgr inż. Andrzej Krupa pracuje w firmie MAN B&W Diesel A/S od 1994 roku. Pracę zawodową rozpoczynał w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku. Pracował w Stoczni Gdańskiej. Od roku 2000 jest dyrektorem Przedstawicielstwa MAN B&W Diesel A/S w Polsce.

Mr Andrzej Krupa, M.Sc., works for MAN B&W Diesel A/S since year 1994. He started his profession career at Polish Academy of Science, Fluid Flow Machinery Institute in Gdansk. Next he worked in Gdansk Shipyard. He is a director of MAN B&W Diesel A/S Representation in Poland since year 2000.

