

CONTEMPORARY DIAGNOSTIC AND TUNING METHODS FOR MARINE DIESEL ENGINES

Tomasz Lus

*Akademia Marynarki Wojennej
Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów
Śmidowicza 69, 81-103 Gdynia
e-mail: t.lus@amw.gdynia.pl tomasz.lus@wp.pl*

Abstract

Contemporary diagnostic and tuning methods and diagnostic tools for marine diesel engines are presented in the paper. Most of them, in their principle, based on measurements of internal cylinder pressure traces, pressure traces in high pressure fuel lines and on vibration signals. Different methods of fuel injection systems monitoring and diagnosing are shown together with malfunction finding in marine engines valve-train mechanisms. Specific aspects of low-, medium- and high-speed marine diesel engines tuning processes are discussed and some examples of malfunction from real maintenance process of engines which were observed with such systems are shown in the paper.

Cylinder head with exhaust valve broken, broken exhaust valve – MB820 engine, pressure curve in cylinder and mean pressure for all engine cylinders after three years engine overhaul, piston group dismantling for engine type TD48 are presented in the paper.

The paper concentrates on strategy of the operation of shipping engines, examples of monitoring systems and diagnostic methods for shipping engines and examples of their damages and inefficients. The dynamic development of the different kind devices for the inspection of the technical state and regulation of shipping engines is an object the paper.

Keywords: *marine diesel engine, diagnostics, tuning*

WSPÓŁCZESNE METODY DIAGNOZOWANIA I REGULACJI OKRĘTOWYCH TŁOKOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH

Streszczenie

W referacie przedstawiono współczesne metody diagnozowania stanu technicznego i regulacji okrętowych tłokowych silników spalinowych. Metody bazujące na pomiarach przebiegów: ciśnień wewnątrz-cylindrowych, ciśnień w instalacji wtryskowej oraz przebiegów drgań. W szczególności omówiono sposoby oceny pracy aparatury paliwowej oraz mechanizmów rozrządu zaworowego. Uwzględnione zostały specyficzne aspekty dotyczące regulacji silników wolno-, średnio- i szybkoobrotowych oraz silników wyposażonych w różne typy układów wtrysku paliwa. Referat zawiera eksploatacyjne przykłady niesprawności wybranych elementów silnika, których rozwój był śledzony z wykorzystaniem metod diagnostycznych.

Głowica cylindra z uszkodzonym zaworem wylotowym, przelom grzybka zaworu wylotowego silnika MB820, przebieg ciśnienia w cylindrze na tle uśrednionego przebiegu ciśnień dla całego silnika w ok. trzy lata po remoncie kapitalnym silnika, demontaż zespołu tłoka – silnik TD48 są ilustrowane w artykule. Artykuł koncentruje się na strategii eksploatacji silników okrętowych, przykładach systemów monitorowania i metod diagnostycznych dla silników okrętowych oraz Przykładach uszkodzeń i niesprawności silników okrętowych. Dynamiczny rozwój różnego rodzaju urządzeń do kontroli stanu technicznego i regulacji silników okrętowych jest przedmiotem artykułu.

Słowa kluczowe: *okrętowe silniki spalinowe, diagnozowanie, regulacja*

1. Wstęp

Rozwój konstrukcji, zmiany zasad eksploatacji i technik wytwarzania współczesnych

okrętowych tłokowych silników spalinowych pociągają za sobą zmiany metod oceny ich stanu technicznego. Współczesne konstrukcje silników okrętowych charakteryzują się coraz częściej między innymi elektronicznie sterowanymi układami wtrysku paliwa, elektronicznie sterowanymi fazami rozrządu, dozowaną elektronicznie ilością oleju smarującego cylindry oraz sterowanymi elektronicznie sekwencyjnymi układami doładowania. Przez wiele lat podstawową strategią eksploatacji silników okrętowych była eksploatacja według ilości przepracowanych godzin. Obecnie coraz częściej strategia ta zastępowana jest strategią eksploatacji według stanu technicznego. Techniki wytwarzania silników okrętowych, nawet tych największych, powoli zmierzają w kierunku produkcji seryjnej. Silnik przestaje być wytworem jednostkowym, wykonywanym na konkretne zamówienie armatora, choć jego głos jest decydujący przy specyfikacji zamówienia. Zmiany konstrukcyjne silników, zmiany zasad eksploatacji i technik ich wytwarzania powodują powstawanie nowych narzędzi diagnostycznych dostarczanych eksploatacjom przez producentów silników bądź też przez producentów specjalistycznej aparatury badawczej. W referacie zostaną przedstawione przykłady takich urządzeń oraz omówione możliwości diagnozowania i regulowania silników okrętowych z ich pomocą.

2. Strategie eksploatacji silników okrętowych

Przez wiele lat okrętowe silniki spalinowe były eksploatowane według ilości wypracowanych godzin - był to tzw. *system obsługi planowych* (*PMS - Planek Maintenance System*). Po osiągnięciu określonego czasu pracy przez silnik dokonywano rutynowych przeglądów i regulacji, napraw bieżących, remontów średnich i głównych. Organizacja takiego sposobu eksploatacji jest stosunkowo prosta, ale wymaga dużych, coraz trudniej uzasadnianych nakładów. Ograniczanie nakładów na eksploatację, spowodowało praktyczne załamanie się systemu obsługi planowych szczególnie na poziomie remontu średniego czy kapitalnego realizowanych w stoczniach. Przeglądy i naprawy bieżące wykonywane na statku realizowane w tym systemie zostały utrzymane, jednak ich zakres jest ograniczany ze względu na oszczędności na częściach zamiennych i materiałach eksploatacyjnych. Na zmianę zakresu prac obsługowych realizowanych na statku ma również wpływ zmiana warunków służby i pracy na morzu. Skróceniu ulega czas szkolenia specjalistycznego marynarzy a co za tym idzie obniża się fachowość członków załóg.

W tej sytuacji w dziedzinie eksploatacji najbardziej skomplikowanych urządzeń jakimi są silniki okrętowe służby techniczne armatorów zaczęły przechodzić do nowego systemu ich eksploatacji, który można nazwać *eksploatacją według stanu technicznego* (*CBM – Condition Based Maintenance*). Takie podejście do eksploatacji niektórych układów silnikowych stosowano już wcześniej np. w odniesieniu do układu smarowania. Systematycznie kontrolowane parametry oleju smarowego silników i ich wymiana nie po określonym czasie pracy a dopiero po przekroczeniu wartości granicznych określonych parametrów, pozwalają od lat na znaczne oszczędności w tej dziedzinie. Eksploatacja według stanu technicznego polega na zastosowaniu takiego podejścia w odniesieniu do całego silnika a przynajmniej do większości jego układów funkcjonalnych. W tym celu armatorzy zatrudniają wyspecjalizowane firmy diagnostyczne zajmujące się diagnostyką eksploatacyjną okrętowych tłokowych silników spalinowych. Zakres badań diagnostycznych wykonywanych przez takie firmy obejmuje zwykle kontrolę szczelności komór spalania, kontrolę jakości procesu spalania w połączeniu z kontrolą pracy aparatury wtryskowej i układu rozrządu zaworowego. Najbardziej newralgiczne układy silników poddawane są systematycznym kontrolom. Nie wszystkie jednak układy silnika są kontrolowane. Brak dostępu, brak odpowiednich urządzeń i metod diagnostycznych powoduje, że eksploatacja silników wg stanu technicznego, tak do końca nie jest możliwa, szczególnie w przypadku starszych typów silników i silników mało podatnych diagnostycznie.

Należy jednak mieć nadzieję, że tzw. „elektronizacja” procesów sterowania pracą silników oraz seryjna produkcja silników okrętowych, pozwoli wyposażać silniki w określone zestawy urządzeń kontrolno-pomiarowo-sygnalizacyjnych, pozwoli również opracować odpowiednie

procedury i całe systemy diagnostyczne bazujące na tych urządzeniach, co obserwujemy coraz częściej w ostatnich latach. Firma MAN B&W oferuje eksploatatorom swoich silników systemy komputerowe CAPA i bardziej rozbudowany system CoCoS [2], których zadaniem jest zwiększenie niezawodności, zmniejszenie kosztów eksploatacji i wydłużenie czasu pracy silników między naprawami. CAPA (Computer Aided Performance Analysis) jest programem komputerowym typu „Systemu Ekspertowego” dostarczającym operatorowi statku cenne informacje na temat pracy silników dla osiągnięcia maksymalnej sprawności eksploatacyjnej przy minimalnym czasie przestoju i minimalnych kosztach obsługi i napraw. CoCoS (Computer Controlled Surveillance) jest systemem nadzoru pracy silników składającym się z komputerowych programów działających w trybie on-line. CoCoS – EDS (Engine Diagnostics System) jest narzędziem diagnostycznym przeznaczonym do wspomagania wyznaczania osiągnięć silników firm MAN B&W i Pielstick. Możliwości diagnostyczne systemu opierają się na ponad 100-letniej wiedzy ekspertów i doświadczeniu firm w projektowaniu, produkcji i obsłudze silników. Narzędzie to pozwala zapisywać w elektronicznym dzienniku maszynowym, monitorować i gromadzić parametry pracy silnika i wyznaczać trendy ich zmian. CoCoS – MPS (Maintenance Planing System) jest narzędziem programowym przeznaczonym do wspomagania planowania i inicjowania prac planowo-zapobiegawczych silników i innych urządzeń okrętowych. CoCoS – SPC (Spare Parts Catalogue) jest narzędziem programowym przeznaczonym do pomocy w identyfikacji zapasowych części zamiennych. Umożliwia dostęp do komputerowego katalogu części zamiennych firmy MAN B&W. CoCoS – SPO (Spare Parts Ordering) jest programem przeznaczonym do obsługi i kontrolowania zapasu części zamiennych oraz zamawiania potrzebnych części. Popularny we flocie światowej system AMOS służy do planowania obsługi, zamawiania części, ale nie posiada funkcji diagnostycznych silników.

3. Przykłady systemów monitorowania i metod diagnostycznych dla silników okrętowych

Pomiary typowych parametrów pracy silnika takich jak ciśnienia i temperatury, spadki ciśnień, prędkości obrotowe, przepływy itp., które na starszych typach statków zapisywane są przez wachtę maszynową w dzienniku maszynowym, w nowoczesnych siłowniach okrętów zapisywane są automatycznie w komputerowym dzienniku maszynowym. Najbardziej istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa statku i narzucone przepisami parametry są w określonym cyklu drukowane i dołączane do typowej dokumentacji. Systemy takie współpracujące dodatkowo z urządzeniami kontroli przekroczeń wartości granicznych wybranych parametrów nazywa się ostatnio systemami monitoringu.

Słowo monitoring, które jeszcze 10 lat temu nie znajdowało się w polskich leksykonach naukowo-technicznych, robi zawrotną karierę w ostatnich latach. Słowo to jest najczęściej kojarzone z kontrolą stanu urządzeń, procesów i całych systemów w aspekcie ich ewentualnego niekorzystnego wpływu na otaczające środowisko. W wolnym tłumaczeniu z języka angielskiego monitoring oznacza kontrolę, ostrzeganie lub sygnalizację ostrzegawczą.

Diagnostyka techniczna bazuje natomiast na pomiarach tzw. nietypowych parametrów towarzyszących pracy silnika. Mogą to być zarówno tzw. procesy wolnozmiennne jak i procesy szybkozmiennne występujące w silniku takie jak przebiegi ciśnień cylindrowych, przebiegi ciśnień wtrysku paliwa czy przebiegi drgań towarzyszące różnym procesom. Metody diagnostyczne powinny dostarczać odpowiednich informacji na temat stanu technicznego bez konieczności zatrzymania i demontażu urządzenia lub najwyżej przy częściowym demontażu.

Różnego rodzaju systemy i urządzenia służące do monitoringu i diagnostyki silników okrętowych występują na rynku od wielu lat i stanowią konstrukcje o bardzo zróżnicowanej konfiguracji. Można je dzielić biorąc pod uwagę różne kryteria.

- Ze względu na przeznaczenie można je podzielić na urządzenia dla silników wolno-, średnio- i szybkoobrotowych.
- Ze względu na ilość, zakres i charakter mierzonych parametrów można je podzielić na

jedno- i wieloparametrowe, na maksymetry i pimetry lub indykatory, na urządzenia mechaniczne i elektroniczne.

- Ze względu na możliwość zapisu i gromadzenie wyników pomiarów można je podzielić na urządzenia bez możliwości i z możliwością rejestracji.
- Ze względu na możliwość wyznaczania z przebiegu krzywej ciśnienia wartości średniego ciśnienia indykowanego można je podzielić na zwykłe indykatory i MIP-kalkulatory (MIP – Mean Idicated Pressure).
- Ze względu na możliwość porównywania wartości wyznaczonych parametrów i przebiegów pomiędzy cylindrami i wartościami uśrednionymi dla całego silnika można je podzielić na analizatory i zwykłe rejestratory.
- Ze względu na możliwość współpracy z zewnętrznymi lub wbudowanymi komputerami klasy PC można je podzielić na urządzenia w pełni autonomiczne i wymagające zewnętrznego komputera.

Klasyfikacja tych urządzeń nie jest jednoznaczna i nie można jej uznać za zakończoną, szczególnie w okresie bardzo dynamicznego rozwoju urządzeń kontrolno-pomiarowych, komputerów i oprogramowania. Ponieważ jednym z najistotniejszych parametrów wykorzystywanych w diagnozowaniu i regulacji okrętowych silników spalinowych jest ciśnienie panujące wewnątrz cylindrów urządzenia te można podzielić na takie, które mierzą te ciśnienie w sposób bezpośredni lub pośredni oraz odnoszą wartości ciśnienia do kąta obrotu wału korbowego lub rejestrują tylko jego największą wartość.

Pomiar bezpośredni ciśnienia cylindrowego odbywa się zwykle na zaworze indykatorowym i może być dokonywany w sposób *okresowy* lub *ciągły*. Ze względu na duże obciążenia mechaniczne i cieplne większość urządzeń jest przystosowana do pomiaru ciśnień w sposób okresowy. Większość z urządzeń spotykanych na rynku działa i może być używana w sposób okresowy, co jest spowodowane ograniczoną trwałością czujników ciśnienia wynikającą z oddziaływania bardzo wysokich temperatur oraz koniecznością okresowego udrażniania kanałów zaworów indykatorowych, szczególnie, gdy silnik spala paliwo pozostałościowe.

Grupę urządzeń działających w sposób okresowy można dalej podzielić na zwykłe rejestratory ciśnień maksymalnych i średnich ciśnień indykowanych – inaczej *testery* (Marine & Industrial Diesel Engine Tester UNITEST-203), (Kistler Engine Tester Type 2507A) oraz bardziej zaawansowane urządzenia umożliwiające rejestrację, porównywanie i analizę parametrów pracy poszczególnych cylindrów i silnika jako całości – *analizatory* (Diesel Engine Analisis System DOCTOR DK2), (KYMA DIESEL ANALYSER – KDA), (DIESEL TUNE III), (AUTRONIKA MIP-Calculator NK-5A, NK-100), (Analizator Parametrów Pracy Silnika – EAD).

Pomiar pośredni ciśnienia cylindrowego może odbywać się w sposób ciągły np. przez pomiar odkształceń w specjalnych podkładkach śrub ściągowych głowic cylindrów, (Permanent Cylinder Pressure Monitoring of Large-Bore Diesel Engines – KISTLER Type 9449Q) lub przez pomiar naprężeń w specjalnych drażonych łącznikach pomiędzy głowicami a zaworami indykatorowymi (Continuous Cylinder Pressure Monitoring – KISTLER Type C-sensor) oraz tuż pod powierzchnią ściany głowicy cylindra (Cylinder Pressure Measuring System – PMI MAN B&W).

Do kontroli ciśnień cylindrowych silników firmy Wärtsilä Sulzer od lat są wykorzystywane systemy NK 5, NK 100 i NK 200 z czujnikami ciśnienia firmy Autronika typu GT. Firma Wärtsilä[4] dla grupy silników 4-suwowych średnio- i szybkoobrotowych produkowanych przez siebie oferuje między innymi elektroniczny indykator ciśnienia cylindrowego dla silników typu Stork SW280, który co minutę rejestruje ciśnienie w cylindrach i przesyła tę informację do komputera w celu jej porównania z wartościami wzorcowymi.

Firma MAN B&W ma w swej ofercie System PMI, który jest analizatorem ciśnienia spalania w cylindrach silnika przystosowanym do współpracy z systemem diagnostycznym silnika EDS wchodzącym w skład rozbudowanego systemu elektronicznego wspomaganie eksploatacji silników, firmy MAN B&W o nazwie CoCoS. System PMI jest analizatorem ciśnień wewnątrz cylindrów,

umożliwiającym zapisywanie, wyświetlanie i analizowanie zmierzonych na statku przebiegów ciśnień. Obsługa systemu jest prosta, jednoosobowa. System jest wyposażony w czuły, ale wytrzymały czujnik ciśnienia spalania połączony z poręcznym urządzeniem pomiarowym. Urządzenie po zarejestrowaniu przebiegów ciśnień pozwala przy użyciu odpowiedniego oprogramowania i komputera PC wskazać cylindry o wartościach ciśnień odbiegających od wartości średniej np. średniego ciśnienia indykowanego (MIP) dla całego silnika oraz ciśnienia maksymalnego (Pmax). Parametry przebiegów ciśnień mogą być przedstawione w postaci tabelarycznej. Można też przedstawiać wykresy przebiegów ciśnień i porównywać je między sobą.

Na polskim rynku urządzeniem podobnym do systemu PMI firmy MAN B&W jest tester silnikowy UNITEST-203 [3] firmy UNITEST z Gdańska.

Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni jest producentem i eksploatuje analizatory pracy silników okrętowych typu EAD, które dysponują możliwościami analogicznymi z produktami przedstawionymi wcześniej a nawet je przekraczającymi. Analiza sygnału drganiowego w czasie, emitowanego przez zderzające się elementy różnych układów silnikowych, jest podstawą przy ocenie poprawności pracy wtryskiwaczy paliwa, pomp paliwowych i zaworów układu wymiany czynnika roboczego.

Analizatory EAD umożliwiają pomiary takich parametrów silnika jak:

MIP – średnie ciśnienie indykowane, **IPOW** – moc indykowana z cylindra, **EPOW** – moc indykowana silnika, **PMAX** – maksymalne ciśnienie spalania, **PEX** – ciśnienie rozprężania 36^oOWK po GMP, **PCOM** – ciśnienie sprężania, **AIGN** – kąt samozapłonu z przebiegu ciśnienia, **AFVO** – kąt całkowitego otwarcia wtryskiwacza (z drgań), **AFVC** – kąt zamknięcia wtryskiwacza (z drgań), **AFVP** – kąt trwania wtrysku (z drgań).

Przykład uszkodzenia silnika wolnoobrotowego wykrytego i śledzonego przy pomocy takiego analizatora przedstawiono w kolejnym rozdziale referatu.

Urządzenia innych firm rzadko oferują możliwość wykorzystania analizy procesów drganiowych w diagnozowaniu silników okrętowych. Dopiero ostatnie lata przyniosły np. pojawienie się zestawu pomiarowego firmy Brüel & Kjær pod nazwą MACHINE DIAGNOSTICS TOOLBOX [1] bazującego na znanym już od dawna systemie PULSE. Narzędzie to pozwala eksploatatorowi siłowni zastosować analizę drgań do diagnozowania szerokiego zakresu uszkodzeń różnych urządzeń, w tym silników tłokowych.

Oprócz urządzeń omawianych powyżej na statkach instalowanych jest coraz więcej systemów monitorujących i diagnostycznych nakierowanych na inne układy funkcjonalne silników niż te związane z komorą spalania i procesami zasilania. Przykładami takich systemów są:

- wykrywacz cząstek metalowych w oleju smarowym (MPD - Metal Particle Detector), który jest niedrogim i łatwym do zainstalowania działającym natychmiast detektorem najmniejszych cząstek metalu obecnych w oleju smarowym silnika,
- w odniesieniu do silników 2-s wolnoobrotowych firma Wärtsilä oferuje system monitoringu stanu technicznego tłoków MAPEX-PR, który kontroluje parametry pracy tłoków podczas pracy silnika. Poprzez ciągłe śledzenie temperatury czynników chłodzących silnik i poszczególne cylindry system wykrywa obszary wzmożonego tarcia, przez co zapobiega zacieraniu tłoków i tulei cylindrowych,
- bezprzewodowy system monitoringu temperatury łożysk korbowych silników typów Sulzer ZA40S, Wärtsilä 25, 46, VASA 32, Wichmann 28 i Stork SW280.

Informacje uzyskiwane z systemów monitoringu i diagnostyki pozwalają załogom maszynowym statków dokonywać niezbędnych napraw i regulacji silników. Najczęściej naprawy i regulacja dotyczą wtryskiwaczy paliwa i pomp wtryskowych, mechanizmów rozrządu zaworowego i układu doładowania.

Mimo doskonalenia systemów monitoringu i diagnostyki silników okrętowych występują jednak nadal ich uszkodzenia, które w niektórych wypadkach mogą pociągać za sobą poważne w skutkach awarie.

4. Przykłady uszkodzeń i niesprawności silników okrętowych

W eksploatacji tak skomplikowanych urządzeń jak silniki okrętowe zdarzają się przypadki uszkodzeń, których wykrycie metodami stałego lub okresowego monitoringu czy nawet zaawansowanych badań diagnostycznych nie jest możliwe. Przykładem takiego uszkodzenia może być pęknięcie grzybka zaworu skutkujące spadkiem mocy silnika, jego niestabilną pracą, co w konsekwencji uniemożliwiało jego obciążenie. Przykład takiego nagłego uszkodzenia silnika MB820 przedstawiono na rysunkach nr 1 i nr 2.

Najbardziej prawdopodobną przyczyną ułamania się części grzybka jednego z zaworów wylotowych mogła być wada materiałowa. Wskazuje na to zarówno wielkość odłamanego elementu zaworu, charakter i kształt przełomu (rys. 2) oraz rodzaj obciążeń, jakim poddawany jest grzybek zaworu. Zakłócenie struktury międzykrystalicznej stali w obrębie grzybka zaworu mogło nastąpić na etapie odlewu, kucia lub obróbki mechanicznej. Najczęstszą przyczyną takiego uszkodzenia zaworu jest przechłodzenie grzybka w początkowej fazie speżniania pręta.



Rys. 1. Głowica cylindra z uszkodzonym zaworem wylotowym

Fig. 1. Cylinder head with exhaust valve broken

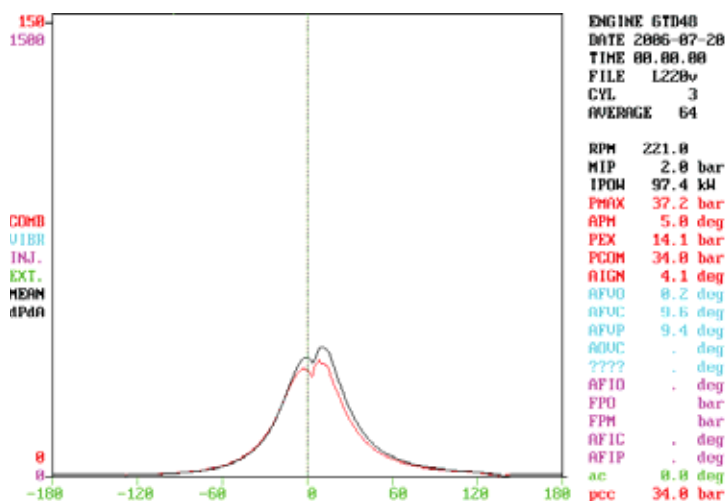


Rys. 2. Przełom grzybka zaworu wylotowego silnika MB820

Fig. 2. Broken exhaust valve – MB820 engine

Przykładem uszkodzenia silnika, które może być wykryte i kontrolowane z użyciem np. analizatora ciśnień wewnątrz-cylindrowych jest uszkodzenie łożyska sworzniia tłokowego silnika 6TD48. Załogę maszynową zaniepokoił fakt pojawienia się opiłków kolorowego metalu w oleju smarowym silnika po upływie około roku od remontu głównego. Mimo wielu wysiłków nie udało się ustalić źródła pojawiania się opiłków w oleju. W międzyczasie silnik został poddany badaniom diagnostycznym z wykorzystaniem analizatora ciśnień typu EAD. W wyniku badania silnika stwierdzono 3% rozrzut ciśnień sprężania (P_{com}) i najniższą jego wartość w cylindrze nr 3. Ponieważ dalej występowała znaczna ilość opiłków w oleju wydano zalecenia dotyczące szczegółowej obsługi układów smarowania silnika. Po dwóch latach od remontu, w wyniku badań diagnostycznych, stwierdzono rozrzut ciśnień sprężania na poziomie 4,6% tym razem przekraczający wartości dopuszczalne przez producentów i źródła literaturowe tj. 2,5 -3%. Zdecydowanie od wartości średniej ciśnienie sprężania odbiegało w cylindrze nr 3. Zalecono sprawdzenie stanu powierzchni tłoka i pierścieni tłokowych, tulei cylindrowej i głowicy oraz dokonanie sprawdzenia szczelności układu w celu wyjaśnienia zaniżonego ciśnienia sprężania. Utrzymano zalecenia odnośnie układów smarowania silnika oraz ograniczono akwen pływania jednostki. Dokonano ponownego przeglądu całego silnika z wykorzystaniem endoskopu jednak i tym razem nie udało się ustalić węzła konstrukcyjnego silnika odpowiedzialnego za emisję opiłków. W trzecim roku eksploatacji silnika od czasu wykonania remontu kapitalnego załoga stwierdziła, że ilość zanieczyszczeń metalicznych znacznie spadła, niemal do zera, silnik ponownie poddano badaniom diagnostycznym z wykorzystaniem analizatora ciśnień. Tym razem

rozrzut ciśnień sprężania wynosił już 11,5% i wzrósł od poprzedniego roku ponad dwukrotnie. Odpowiedzialnym za ten fakt było ponownie najniższe ciśnienie w cylindrze nr 3. Zalecono wstrzymanie eksploatacji silnika, sprawdzenie wysokości komory sprężania i szczelności cylindra nr 3. Zalecono również jako dalszy ewentualny krok sprawdzenie czy korbowód nie jest ugięty. Załoga i przedstawiciele stoczni remontowej i tym razem jeszcze nie chcieli dać wiary diagnostom, twierdząc, że przyczyną takich wyników diagnozowania musi być niedrożny kanał lub zawór indyktorowy trzeciego cylindra. Po wymianie zaworu indyktorowego i ponownym badaniu silnika zły stan się potwierdził. Wtedy dopiero dokonano badania wysokości komór sprężania.



Rys. 3. Przebieg ciśnienia w cyl. nr 3 (kolor szary/czerwony) na tle uśrednionego przebiegu ciśnień dla całego silnika (kolor czarny) w ok. trzy lata po remoncie kapitalnym silnika
 Fig. 3. Pressure curve in cylinder nb 3 (grey/red line) and mean pressure for all engine cylinders (black line) three years after engine overhaul



Rys. 4. Demontaż zespołu tłoka – silnik TD48
 Fig. 4. Piston group dismantling – engine type TD48

Komora sprężania w cylindrze nr 3 miała wysokość ok. 11mm, podczas gdy dla pozostałych, sprawnych cylindrów silnika wynosiła ona ok. 7mm. Dopiero po tym ustaleniu dokonano demontażu całego trzeciego układu (rys. 4) i stwierdzono co następuje:

- poprawny stan łożyska korbowego,
- brak skrzywienia korbowodu,
- bardzo zaawansowane zużycie brązowej tulei sworznia tłoka oraz początku zużycia powierzchni samego sworznia.

Po trzech latach poszukiwań okazało się, że odpowiedzialność za występowanie opiłków metalowych w oleju ponosiła zużywająca się brązowa tuleja sworznia tłokowego cylindra nr 3. Dzięki konsekwentnemu stosowaniu okresowej kontroli stanu technicznego silnika, można było tą niesprawność kontrolować a następnie ustalić i to w takim momencie, w którym mogła ona doprowadzić do poważnego uszkodzenia silnika.

Badania diagnostyczne pozwoliły kontrolować cały proces rozwijania się uszkodzenia w sposób bezpieczny dla silnika, pozwoliły eksploatować silnika w sposób prawie normalny (z pewnymi ograniczeniami). Koszt naprawy węzła łożyskowego sworznia trzeciego cylindra i kosztu bieżącego diagnozowania okazały się wielokrotnie mniejsze niż ewentualny remont całego silnika w celu wykrycia niesprawności na zasadzie kompletnego demontażu jego węzłów kinematycznych, w których występują elementy z brązu.

Gdyby silnik nie był szczególnie wnikliwie kontrolowany z powodu opiłków metalu w oleju i gdyby nie kontrolowano ciśnienia sprężania w cylindrach z wykorzystaniem analizatora a tylko, jak to ma miejsce w tradycyjnych systemach diagnostyki, ciśnienie maksymalne maksymetrem,

być może zwiększono by na trzecim cylindrze kąt wyprzedzenia wtrysku lub zwiększono by dawkę paliwa w celu uzyskania odpowiednich parametrów regulacji silnika. To mogłoby pociągnąć za sobą fatalne skutki dla silnika. W silnikach TD48 zbudowanych na licencji nieistniejącej już dziś firmy SULZER w węźle łożyskowym sworznia tłoka stosuje się tuleje z brązu jako bardziej niezawodne niż początkowo stosowane łożyska wylane białym metalem. Łożyska wylane stopem łożyskowym zwanym białym metalem uszkadzały się w sytuacjach, gdy silnik był nagle zatrzymywany z dużego obciążenia bez należytego schłodzenia tłoków. Tłoki o masie sięgającej 860 kg wyciskały na boki miękki stop z łożyska. Skłoniło to producentów silników do przejścia w tym węźle łożyskowym na stosowanie tulei z brązu jako twardszych i bardziej odpornych na skoki temperatury. Od tej modernizacji uszkodzenia łożysk sworznia tłokowego w silnikach typu TD48 prawie nie występowały, co myliło diagnostów, eksploatorów i stoczniovców.

5. Wnioski

Postępuje dynamiczny rozwój różnego rodzaju urządzeń do kontroli stanu technicznego i regulacji silników okrętowych. Coraz więcej producentów silników dostarcza swoje wyroby wraz z urządzeniami i systemami do diagnozowania i monitoringu silników. Bez względu na stopień zaawansowania tych urządzeń nie do przecenienia pozostają jednak wiedza i umiejętności mechaników okrętowych. Umiejętności w obsłudze i wykorzystaniu tego typu urządzeń są doskonałe na kursach zawodowych dla członków załóg i przedstawicieli pionów technicznych armatorów. Wszystkie te wysiłki razem mają doprowadzić do uzyskania możliwie dużej efektywności w eksploatacji okrętowych tłokowych silników spalinowych.

Literatura

- [1] Brüel & Kjær *Machine Diagnostics Toolbox* Industrial Solutions, 2006.
- [2] MAN B&W *Marine Engine Programme 3rd edition 2006* and other information leaflets.
- [3] UNITEST *Marine & Industrial Diesel Engine Tester UNITEST-203*.
- [4] Wärtsilä *Total Service Product Programme 2006* and other information leaflets.