

## STAN DIAGNOSTYKI TECHNICZNEJ OKRĘTOWYCH SILNIKÓW TŁOKOWYCH

Kazimierz WITKOWSKI

Katedra Siłowni Okrętowych, Akademia Morska w Gdyni  
81 – 125 Gdynia ul. Morska 83, wika@am.gdynia.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono okrętowy silnik tłokowy jako złożony obiekt diagnostyki. Podzielono go na układy funkcjonalne. Taka dekompozycja obiektu pozwala rozwiązywać zadania diagnostyczne w strukturach zdecentralizowanych. Omówiono możliwości diagnozowania silników okrętowych w warunkach eksploatacyjnych. Przedstawiono szereg przykładów wdrożonych do eksploatacji systemów diagnostycznych.

Słowa kluczowe: diagnostyka eksploatacyjna, silniki okrętowe, diagnozowanie silników.

### THE STATUS OF THE MARINE DIESEL ENGINES TECHNICAL DIAGNOSTIC

#### Summary

In his paper a marine diesel engine has been described as a complex technical object. Divided into functional blocks. Such decomposition allows to solve diagnostic problems in decentralized structures. Also the possibilities of marine engine diagnostic have been described with a series of examples of systems already in use.

Keywords: operation diagnostic, marine diesel engine, diesel engine diagnostic .

### 1. OKRĘTOWY SILNIK TŁOKOWY JAKO OBIEKT DIAGNOSTYKI

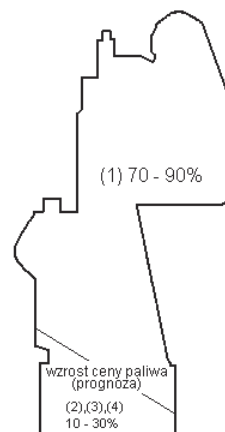
Tłokowe silniki wysokoprężne stanowią w zdecydowanej większości napęd główny statków, jak również elektrowni okrętowych. Koszty ich eksploatacji są bardzo duże, przede wszystkim z uwagi na stale utrzymujące się bardzo wysokie ceny paliw i olejów smarowych. Stąd koszty eksploatacji silników okrętowych stanowią ponad 70% kosztów eksploatacji całej siłowni okrętowej. Udział kosztów paliwa i olejów smarowych w kosztach eksploatacji siłowni okrętowej z silnikami tłokowymi z zapłonem samoczynnym pokazano za rysunku 1.

Na rysunku 2 pokazano przykładowe koszty eksploatacji statku do przewozu ładunków masowych z uwzględnieniem kosztów paliwa. Bezpośredni związek pomiędzy niezawodnością okrętowych silników tłokowych a bezpieczeństwem żeglugi oraz ich udział w kosztach eksploatacji powodują, że na statkach przeważająca liczba metod i urządzeń diagnostycznych opracowywana jest z myślą o tych obiektach.

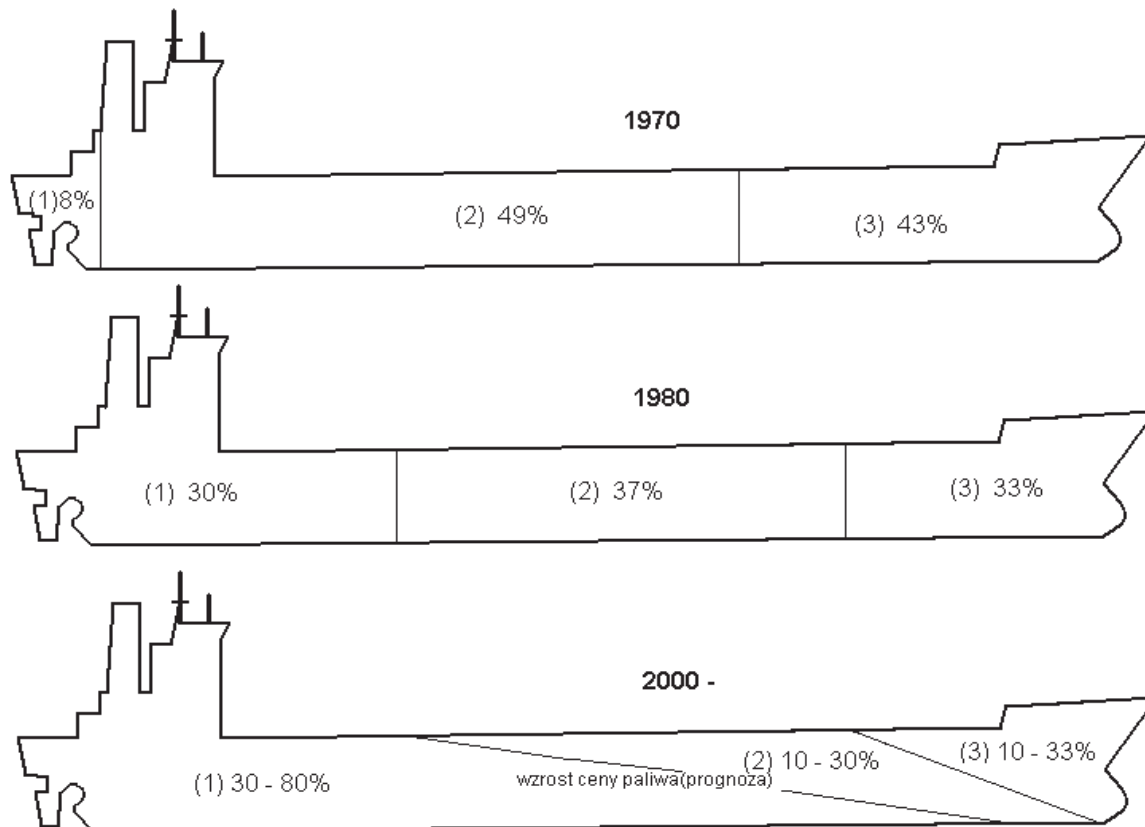
Okrętowy silnik tłokowy jest złożonym obiektem technicznym, który można podzielić na szereg układów funkcjonalnych. Najważniejsze z nich to:

1. **Układ tłokowo-korbowy**, którego zadaniem jest zamiana sił gazowych działających na tłok w moment obrotowy wału korbowego.

Realizowane jest to na drodze zamiany ruchu posuwisto-zwrotnego tłoka na ruch obrotowy wału korbowego. Jest to układ charakteryzujący się wysokim poziomem obciążeń cieplnych i mechanicznych, które mogą być przyczyną licznych niesprawności tego układu, a nawet awarii.



Rys.1. Udział kosztów paliwa i olejów smarowych w kosztach eksploatacji siłowni okrętowej z silnikiem z zapłonem samoczynnym  
1. koszty paliwa i oleju smarowego, 2. koszty kapitałowe i ubezpieczeń, 3. koszty załogowe, 4. koszty pozostałe (remonty, części zamienne, materiały konserwacyjne)



Rys.2. Koszty eksploatacji statku typu masowiec (170 000 DWT) z uwzględnieniem kosztów paliwa  
 1. koszty rejsowe (paliwo, opłaty portowe i kanałowe), 2. koszty dzienne (załogowe, administracyjne, ubezpieczeniowe), 3. koszty kapitałowe

- 2. Układ wymiany czynnika roboczego** jest odpowiedzialny za napełnianie przestrzeni roboczej silnika świeżym ładunkiem (powietrzem) i usuwaniem zeń spalin po poprzednim cyklu. W silnikach czterosuwowych jest to układ zaworowy, a w silnikach dwusuwowych szczelinowo – zaworowy (w przeszłości szczelinowy). Integralną częścią tego układu jest turbosprężarka, bowiem silniki napędu głównego i silniki elektrowni okrętowej buduje się jako doładowane. W układzie wymiany czynnika roboczego możliwe jest występowanie szeregu niesprawności, które pogarszają przebieg wymiany ładunku i procesu spalania, spadek osiągnięć silnika, w tym ekonomiczności jego pracy.
- 3. Układ zasilania paliwem** odpowiadający za podawanie bezpośrednio do cylindrów odpowiednich ilości paliwa odpowiadające chwilowemu zapotrzebowaniu mocy. Paliwo to powinno docierać do cylindra w postaci rozpylonej i w odpowiednim czasie. Pompy wtryskowe, przewody wysokiego ciśnienia (wtryskowe) i wtryskiwacze to elementy układu, od niezawodnego działania których zależy poprawna i ekonomiczna praca silnika. Najwięcej niesprawności silnika występuje w elementach tego układu, a szczególnie w pompach wtryskowych i wtryskiwaczach.
- 4. Układ smarowy** którego zadanie polega na zasilaniu olejem smarowym współpracujące pary trybologiczne (cierne). Olej smarowy doprowadzany jest do wszystkich łożysk, przegubów, przekładni napędowych oraz na gładzie tulei cylindrowych. Do smarowania tych ostatnich, w silnikach okrętowych średniej, dużej i wielkiej mocy stosuje się olej o specjalnych właściwościach, tj.: olej cylindrowy, doprowadzany do kilku punktów na obwodzie tulei cylindrowych., do czego wykorzystuje się zwykle zespoły pompki smarowych nazywanych lubrykatorami. Właściwy dobór oleju smarowego, dbałość o jego stan w eksploatacji oraz prawidłowe działanie układu smarowego gwarantują poprawną pracę poszczególnych par ciernych. Niesprawności i awarie elementów tego układu są rzadkością, ale ich konsekwencje mogą być bardzo poważne i kosztowne, bowiem ich usuwanie związane jest zazwyczaj z co najmniej kilkugodzinną przerwą w pracy silnika, a więc i statku i może stanowić wówczas zagrożenie bezpieczeństwa żeglugi.
- 5. Układ chłodzenia** ma za zadanie utrzymywanie określonej temperatury elementów silnika, nagrzewających się od czynnika roboczego oraz wskutek tarcia. Do chłodzenia tulei cylindrowych, głowic i nadal w wielu przypadkach korpusów turbin turbosprężarkowego układu doładowania stosuje

się wodę słodką. Duże znaczenie ma również chłodzenie tłoków (wodą słodką lub olejem smarowym) i wtryskiwaczy (wodą słodką lub paliwem). Prawidłowe działanie układów chłodzenia, dbałość eksploatacyjna o jakość czynników chłodzących i utrzymywanie właściwych parametrów pracy układu są zazwyczaj wystarczającym warunkiem bezpiecznej eksploatacji.

6. **Układ rozruchowy i rozruchowo-nawrotny.** Układ rozruchowy służy do rozruchu silnika w żądanym kierunku. Najczęściej odbywa się to energią sprężonego do ciśnienia około 3 MPa powietrza, które nadaje silnikowi rozruchową prędkość obrotową niezbędną do samozapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej. Układ rozruchowo-nawrotny służy do rozruchu i zmiany kierunku obrotów silnika dla statków z konwencjonalnym układem napędowym ze śrubą o stałym skoku, co jest nieodzowne do zmiany kierunku ruchu np.: z „naprzód” na „wstecz”. Układ ten należy do grupy dużego ryzyka – „słabych” ogniw silnika. Oczywiście i w tym systemie mogą wystąpić niesprawności, z których część może utrudnić, a nawet uniemożliwić rozruch silnika. Dlatego skuteczna diagnostyka i możliwie szybkie usuwanie wykrytych niesprawności jest ważne.

Podział silnika okrętowego na układy funkcjonalne może być przydatny przy rozwiązywaniu zadań diagnostycznych. Mówi się wówczas o diagnostyce w strukturach zdecentralizowanych, uzyskanych przez dekompozycję obiektu. Ważną zaletą wynikającą z takiego podejścia, w odniesieniu do silników okrętowych jest możliwość wytypowania do diagnostyki w pierwszej kolejności te układy, w których niesprawności występują częściej i te których niesprawności mogą wywoływać poważne konsekwencje dodatkowe, to jest zagrożenie bezpieczeństwa statku i duże straty ekonomiczne.

Bazując na statystyce uszkodzeń elementów silników okrętowych można wytypować w ramach dokonanej dekompozycji silnika te węzły funkcjonalne, w których niesprawności występują częściej i ich wpływ na pracę silnika jest istotny. Jako słabe ogniwa należy uznać:

- układ zasilania paliwem, w tym pompy wtryskowe i wtryskiwacze,
- układ wymiany czynnika roboczego, w tym filtry powietrza, sprężarki doładowujące, chłodnice i turbiny,
- układ tłokowo-korbowy, w tym tłoki z pierścieniami, tuleje cylindrowe, łożyska korbowe i główne oraz wał korbowy.

## 2. MOŻLIWOŚCI DIAGNOZOWANIA SILNIKÓW OKRĘTOWYCH W EKSPLOATACJI

Celem utylitarnym diagnostyki [1, 2, 3], w tym diagnostyki silników okrętowych jest:

- realizacja zadań prowadzących do rozpoznawania i określenia aktualnego stanu czego wynikiem jest diagnoza,
- rozpoznawanie przeszłych stanów silnika czego wynikiem jest geneza czyli określenie przyczyn zaistnienia obecnego stanu, rodzaju i przyczyn niesprawności czy uszkodzenia,
- przewidywanie przyszłych stanów silnika, czego efektem jest prognoza rozumiana jako określenie horyzontu czasowego przyszłej zmiany stanu technicznego.

Realizacja powyższych zadań nazywana jest często pełną diagnozą stanu badanego obiektu mechanicznego [3].

Działania diagnostyczne mogą odnosić się do:

- prototypu silnika i wówczas jest to diagnostyka konstrukcyjna,
- silnika po jego wytworzeniu – diagnostyka kontrolna,
- silnika w trakcie eksploatacji – diagnostyka eksploatacyjna.

Wszystkie wymienione działania mają bardzo istotne znaczenie, dając gwarancję wytworzenia dobrej jednostki napędowej, która właściwie obsługiwana i na bieżąco diagnozowana zapewni bezpieczną i ekonomiczną eksploatację.

W rozważaniach szczegółowych mówiąc o diagnostyce okrętowych silników tłokowych, jako przykładu złożonego obiektu technicznego, odnoszę się tylko do diagnostyki eksploatacyjnej.

Eksploatacja silnika okrętowego powinna być niezawodna i bezpieczna. Jednym z istotnych warunków, który musi być spełniony jest przestrzeganie przez eksploatatora – oficera mechanika wytycznych producenta zawartych w dokumentacji techniczno-ruchowej silnika, odnosząc się zarówno do obsługi bieżącej jak i okresowych przeglądów i remontów. Mimo rzetelnego wypełniania powyższych zadań podczas eksploatacji mogą wystąpić w poszczególnych węzłach funkcjonalnych silnika niesprawności, które nie wykryte w porę mogą się rozwijać i doprowadzić do wystąpienia awarii. Wyłączenie silnika okrętowego z ruchu na skutek awarii może być niebezpieczne i może prowadzić do awarii, a nawet katastrof morskich, powodując olbrzymie straty ekonomiczne.

## 3. METODY BADANIA DIAGNOSTYCZNEGO

Metody badania diagnostycznego uwarunkowane są stanem wyposażenia silnika okrętowego w urządzenia kontrolno-pomiarowe. W oparciu o ten sprzęt eksploatator ma dostęp do szeregu parametrów, których podstawowa ilość nazywana jest „zestawem parametrów rutynowo mierzonych”.

Część tych parametrów, stanowiąc pewien zbiór minimalny, ważny ze względu na bezpieczeństwo statku określona została przepisami towarzystw klasyfikacyjnych i administracji morskiej. Biorąc pod uwagę potrzeby diagnostyki należy uwzględnić wartość informacyjną danego parametru, jego związek z odpowiednim parametrem struktury, co decydować będzie o możliwościach lokalizacji niesprawności, ale także należy brać pod uwagę

dostępność i łatwość pomiaru danego parametru. To ostatnie niestety jest często kryterium podstawowym, niezależnie od braku możliwości spełnienia dwóch pierwszych.

W tabeli 1 zestawiono wybrane parametry pracy silnika wskazując na ich wartość informacyjną, możliwość lokalizacji niesprawności oraz dostępność i łatwość pomiaru.

Tabela 1. Przykładowe parametry pracy silnika okrętowego z uwzględnieniem ich przydatności diagnostycznej

L.p	Parametry	Przydatność diagnostyczna		
		Wartość informacyjna	Lokalizacja niesprawności	Dostępność i łatwość pomiaru
1.	Prędkość obrotowa silnika	5	2	5
2.	Temperatura spalin za cylindrami	5	2	5
3.	Temperatura wody chłodzącej	5	3	5
4.	Temperatura oleju obiegowego	2	2	5
5.	Prędkość obrotowa turbosprężarki	4	4	5
6.	Ciśnienie powietrza ładującego	3	4	5
7.	Spadek ciśnienia powietrza na chłodnicy powietrza	4	5	5
8.	Maksymalne ciśnienie w cylindrze	3	2	2
9.	Temperatura gładzi tulei cylindrowej w wybranym punkcie	4	5	1
10.	Temperatura łożysk układu korbowego	4	5	1
11.	Maksymalne ciśnienie wtrysku paliwa	5	4	1

W tabeli przyjęto umowną ocenę przydatności diagnostycznej danego parametru stosując skalę od 1 do 5. Bardzo niskiej wartości informacyjnej, słabej lokalizacji niesprawności i dostępności oraz trudności pomiarowej odpowiada „1”, a wysokiej przydatności „5”.

Powszechnie uważa się, że zestaw parametrów rutynowo mierzonych jest niewystarczający do stawiania w pełni wiarygodnych diagnoz. Szczególnie odnosi się to do bieżącej kontroli stanu silnika w trakcie eksploatacji. Na przykład, w warunkach eksploatacji statku ocenę poprawności smarowania łożysk silnika próbuje się dokonać w oparciu o analizę parametrów oleju smarowego – ciśnienie i temperaturę. Szybkość zachodzących w łożyskach zmian na skutek złożonych procesów trybologicznych oraz duża bezwładność cieplna oleju powodują, że wykorzystanie tych parametrów do wczesnego wykrywania niesprawności i zagrożenia awaryjnego jest wątpliwe. Należy więc uzupełnić parametry dotychczas dostępne np. o temperaturę łożysk. Wymaga to jednak montażu w łożyskach czujników temperatury. Nie jest to więc parametr dostępny i łatwy pomiarowo, a także wymaga znaczących nakładów inwestycyjnych. Interesujące wydają się próby z wykorzystaniem do wczesnego wykrywania stanów awaryjnych łożysk pomiaru rezystancji filmu olejowego [4].

Do jednego z bardziej zawodnych węzłów funkcjonalnych silnika należy aparatura wtryskowa, a w niej wtryskiwacz. Najczęściej w eksploatacji wnioskowanie diagnostyczne odbywa się pośrednio, poprzez analizę takich parametrów procesu roboczego jak ciśnienie maksymalne w cylindrze i temperatura gazów wylotowych. Znacząco można wspomóc diagnozowanie pomiarem przebiegu

ciśnień w układzie wtryskowym. Jest to sposób ogólnie znany i ceniony, ale w warunkach

eksploatacyjnych statku wykorzystywany bardzo rzadko. Trudności pomiarowe wynikają między innymi z tego, że układ wtryskowy ze względów bezpieczeństwa traktowany jest jako bezingerencyjny. Decyduje to o trudności wyboru miejsca pomiaru i uzyskania akceptacji towarzystw klasyfikacyjnych. Dobrym przykładem pozytywnego rozwiązania tej kwestii jest między innymi system pomiarowy „NK” firmy Autronica.

Pełniejsze dane otrzymuje się podczas badań okresowych silnika, w ramach których zazwyczaj można uzupełnić dotychczasowe dane o parametry dodatkowo zmierzone np. dotyczące indykowania silnika (średnie ciśnienie indykowane  $p_i$ , maksymalne ciśnienie spalania  $p_{max}$ , moc indykowana  $N_i$  i inne). Otrzymane dane dodatkowe zależne są od posiadanych narzędzi pomiarowych oraz oprzyrządowania silnika. Najlepiej gdyby wielkości indykowane otrzymano z indykatora elektronicznego. Nie jest to jednak wyposażenie, które można już dzisiaj uznać za standardowe, choć występuje coraz częściej.

Niezależnie jednak od liczności parametrów poddawanych analizie, jednoznaczność i wiarygodność diagnozy pozwalające na lokalizację niesprawności i określenie jej przyczyny, zależą w głównej mierze od wiedzy i doświadczenia eksploatatora – oficera mechanika.

Powyższe rozważania wskazują na niezadowalający stan diagnostyki oraz na potrzebę szerokiego i powszechnego wdrażania na statki urządzeń i systemów diagnostycznych. Wówczas wiedza i doświadczenie zawodowe eksploatorów i wykorzystywanie systemów diagnostycznych gwarantować będą bezpieczną eksploatację silników okrętowych.

#### 4. PRZYKŁADY DIAGNOZOWANIA SILNIKÓW OKRĘTOWYCH

Pomimo ogólnie niezadowalającego stanu eksploatacyjnej diagnostyki silników okrętowych, istnieje szereg przykładów wdrażania na statki różnych rozwiązań technicznych, zmierzających do poprawy tego stanu. Część z nich to efekt prac firm zajmujących się produkcją elektronicznej aparatury kontrolno-pomiarowej, np.: Autronica, Norcontrol, ASEA, STL. Jednocześnie zajmują się tym również producenci silników okrętowych, w tym szczególnie firmy MAN-BiW, Wärtsilä (Wärtsilä –Sulzer), Pielstick i Mitsubishi.

Jako najbardziej reprezentatywne i dobrze w okrętownictwie znane należy wymienić takie systemy jak:

1. System „Data Trend” firmy Norcontrol [5], który na podstawie parametrycznej metody diagnozowania pozwala ocenić stan techniczny elementów układu tłokowo-cylindrowego, układu doładowania, aparatury wtryskowej silnika oraz dodatkowo kotła utylizacyjnego. Rejestrowany jest również stan porostania kadłuba statku. W celu uzyskania istotnych dla diagnostyki parametrów rejestrowany jest nie tylko ich zestaw standardowy, ale także szereg wielkości uzupełniających, takich jak: temperatura tulei cylindrowych, ciśnienia gazów w cylindrach oraz paliwa w przewodach wtryskowych.
2. System CC-10 firmy BiW [6] zbudowano do kontroli stanu technicznego silników napędu głównego. System kontroluje następujące węzły funkcjonalne silnika:
  - układ wymiany ładunku,
  - układ tłokowo-cylindrowy,
  - układ wtryskowy,
  - mechanizmy pomocnicze obsługujące silnik.
 Liczne sygnały pomiarowe analizowane są przez system mikroprocesorowy. Podawane eksploatorowi informacje to przede wszystkim analiza trendu oraz sygnalizacja wartości granicznych.
3. System SEDS firmy Sulzer [7] powstał w celu kontroli pracy i diagnostyki silników okrętowych napędu głównego. System realizuje pomiary kilkunastu parametrów, za co odpowiada blok „DATA”. Blok ten sprawdza też okresowo poprawność pracy poszczególnych przetworników pomiarowych. Szybki dostęp eksploatora do rezultatów pomiarów

i wizualizację pomierzonych parametrów zapewnia blok „INSTANT”. Nad poprawnością pracy całego systemu czuwa blok „HELP”.

4. Systemy Comos i DMTAS firmy MITSUBISHI [8, 9] obsługują silniki napędu głównego oraz pomocnicze. Parametry mierzone są na bieżąco i porównywane z ich wartościami wzorcowymi. Prowadzona jest analiza trendu tych parametrów.
5. System CoCoS-EDS firmy MAN-B&W (Computer Controlled Surveillance – Engine Diagnostics System) [10] przewidziano do monitorowania, zapisywania, i archiwizowania parametrów pracy silnika oraz prowadzenia analizy trendu tych parametrów. System pracuje w sposób ciągły i jest połączony z systemami alarmów siłowni okrętowej. Dzięki temu zdiagnozowana niesprawność zagrażająca bezpieczeństwu silnika jest bezzwłocznie sygnalizowana.
6. System CAPA (Computer Aided Performance Analysis software program) [11] firmy MAN-B&W jest komputerowym specjalizowanym programem służącym do diagnozowania silników 2-suwowych napędu głównego tego producenta. Powstał w oparciu o wiedzę ekspertów oraz bogate dane statystyczne zebrane przez MAN-B&W w eksploatacji. CAPA w sposób ciągły monitoruje pracę silnika. Parametry mierzone są przeliczane na warunki standardowe i porównywane z ich wartościami wzorcowymi. W oparciu o pozyskane dane i ich obróbkę wskazuje się te parametry, których wartości przekraczają dopuszczalne. W oparciu o wykryte niesprawności i specjalne procedury modelowe system wypracowuje odpowiednie decyzje eksploatacyjne i rekomenduje wykonanie określonych czynności obsługowych.
7. System MAPEX [12, 13] (Monitoring and mAintenance Performance Enhancer with eXport knowledge –wskład którego wchodzi następujące podsystemy:
  - MAPEX – PR (Piston-running Reliability) służy do ciągłego monitorowania stanu tulei cylindrowych długoskokowych 2-suwowych silników okrętowych firmy SAULZER. Alarmuje w przypadku przekroczenia dopuszczalnych temperatur gładzi tulei cylindrowych w wyznaczonych punktach, analizuje zmiany temperatury wody chłodzącej tuleje i temperaturę powietrza doładowującego. Ważnymi danymi ogólnymi niezbędnymi do prowadzonej kontroli stanu technicznego są informacje o obciążeniu silnika.
  - SIPWA – TP (Sulzer Integrated Piston-ring Wear-detecting Arrangement with Trend Processing) służy do diagnozowania pierścieni tłokowych. Diagnostyka opiera się o sygnały otrzymywane z czujnika umieszczonego w tulei cylindrowej nieco powyżej okien dolotowych. System umożliwia rozpoznawanie różnych stanów pierścieni tłokowych (pęknięte,

zapieczone, zużyte). System jest wykorzystywany do optymalizacji zużycia oleju cylindrowego, co z kolei przyczynia się do obniżenia kosztów eksploatacji, ale także obniżenia emisji toksycznych składników spalin.

MAPEX – CR (Combustion Reliability) w sposób ciągły monitoruje proces spalania w poszczególnych cylindrach.

MAPEX – TV (Torsional Vibration dedector) chroni elementy silnika i przekładnię przed negatywnym wpływem pracy silnika w stanie „gubienia zapłonów” w poszczególnych cylindrach.

MAPEX – AV (Axial Vibration detektor) monitoruje pracę tłumnika drgań wzdłużnych i sygnalizuje stany alarmowe gdy poziom drgań przewyższa wartość akceptowaną.

8. CDS [14] (Complex Diagnostic System) służy do diagnostyki silników okrętowych i został podzielony na trzy następujące poziomy robocze:

- Poziom pierwszy – **silnik** – generalny nadzór stanu technicznego silnika,
- Poziom drugi – **węzły funkcjonalne silnika** – analiza przebiegu ciśnień w cylindrach CPA (Combustion Pressure Analysis) i w układach wtryskowych paliwa IPA (Injection Pressure Analysis). Układ ten współpracuje z czujnikiem położenia wału korbowego. Wykresy indykatorowe są wyświetlane na bieżąco, podlegają obróbce statystycznej i są archiwizowane. W oparciu o wykonane pomiary tworzone są i drukowane protokoły.
- Poziom trzeci – **części silnika** – pierścienie tłokowe PRA (Piston Ring Analysis) których diagnostyka opiera się o sygnały z czujników umieszczonych w dolnej części tulei cylindrowych mierzących zmianę oporności magnetycznej i czujnika położenia wału korbowego. Układ ten wykrywa między innymi takie uszkodzenia jak: zapieczenie pierścieni w rowkach, wypalenie pierścieni i ich popękanie. Ochronę przed zacieraniem tulei cylindrowych stanowi SAS (Scuffing Alarm System). Informacji o fazach rozrządu zaworów dolotowych i wylotowych dostarcza system LMS (Leakage Measurement System).

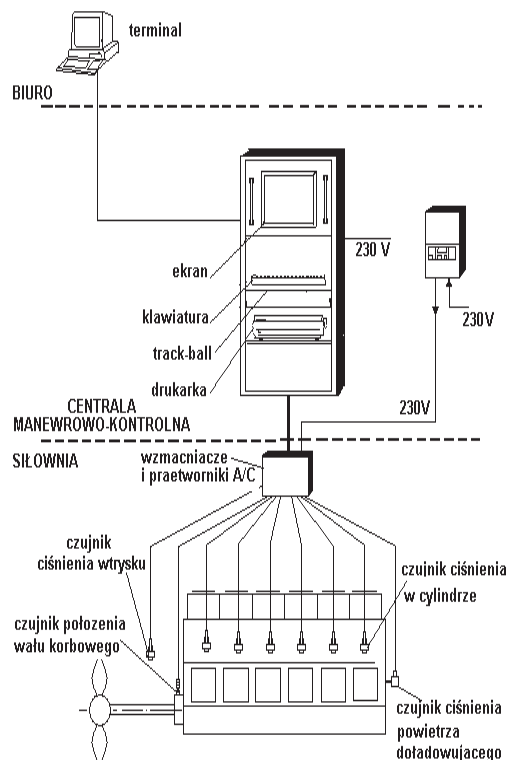
System CDS uwzględnia również możliwość włączenia dodatkowych torów pomiarowych, w tym do pomiaru momentu obrotowego i obliczania mocy efektywnej silnika TMS (Torque Measurement System) oraz do diagnostyki łożysk wału śrubowego PES (Propeller Shaft Erthing System).

Dotychczas jednak najpowszechniej w diagnostyce silników okrętowych wykorzystywane są analizatory przebiegów okresowych, zwane analizatorami ciśnień, indykatorami elektronicznymi lub kalkulatorami średniego ciśnienia indykowanego MIP (Mean Indicated Pressure) [15]. Buduje się je w wersji stacjonarnej lub przenośnej. Typową konfigurację

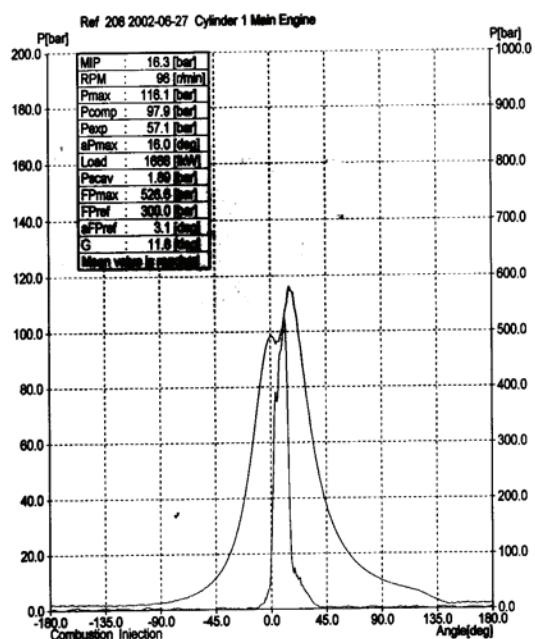
stacjonarnego indykatora elektronicznego, przeznaczonego do pracy ciągłej, na przykładzie rozwiązania firmy Autronica [15] – MIP Calculator NK-100 pokazano na rysunku 3.

Urządzenia te są przeznaczone do pomiaru, rejestracji cyfrowej i wizualizacji przebiegów ciśnienia spalania i wtrysku paliwa w funkcji kąta obrotu wału korbowego, w ustalonych warunkach pracy silnika okrętowego. Najważniejszymi elementami indykatora elektronicznego są: czujniki ciśnienia spalania i wtrysku paliwa, czujnik położenia wału korbowego i górnego martwego punktu tłoka (GMP), wzmacniacze sygnałów, przetworniki analogowo-cyfrowe oraz mikroprocesorowa jednostka centralna (komputer). Przykładowe wyniki pomiarów przebiegu ciśnienia spalania i wtrysku wykonane systemem NK-100 pokazano na rysunku 4.

Urządzenia tego typu konstruowane są również w Polsce. Jednym z przykładów jest mikrokomputerowy analizator przebiegów okresowych wyposażony dodatkowo w analizator drgań opracowany w Instytucie Technicznej Eksploatacji Okrętów Akademii Marynarki Wojennej [16, 17]. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów wykonanych tym analizatorem.

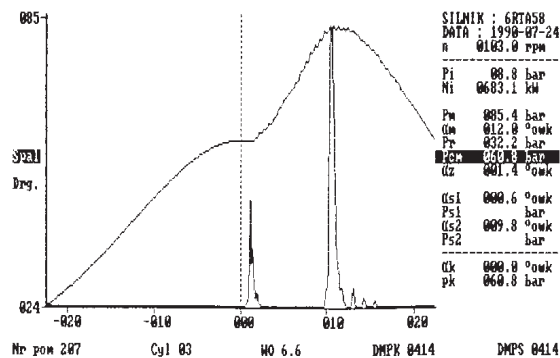


Rys. 3. Schemat blokowy stacjonarnego indykatora elektronicznego NK-100 firmy Autronica



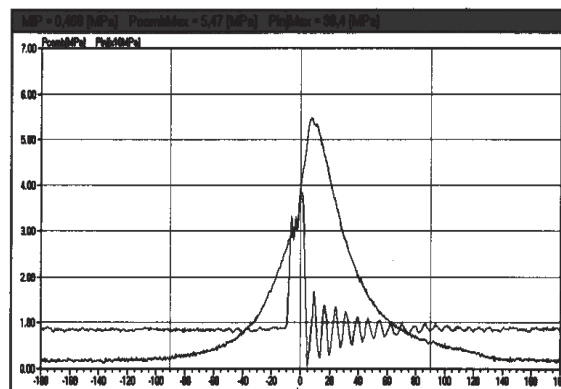
Rys. 4. Przykładowy wydruk zarejestrowanych ciśnień indykatorem NK-100

Stacjonarne i przenośne indykatory elektroniczne produkowane są również przez firmę UNITEST, jako efekt prac prowadzonych w Katedrze Siłowni Okrętowych Akademii Morskiej w Gdyni [18, 19].



Rys. 5. Przykład rejestracji ciśnienia w cylindrze i obwiedni drgań indykatorem AMW

Przykład rejestracji ciśnień indykatorem stacjonarnym UNITEST 201 pokazano na rys. 6. System przenośny UNITEST 203 rejestruje przebieg ciśnień w cylindrze, a zarejestrowane dane można transmitować do komputera. W indykatorze tym zastosowano pośrednią metodę pozycjonowania wału korbowego silnika, opartą o założenie, że maksimum ciśnienia sprężania występuje w GMP. Szczegółowo procedury te opisano w pracy [19].



Rys. 6. przebieg ciśnienia w cylindrze i w przewodzie wtryskowym zarejestrowane indykatorem UNITEST 201

## 5. WNIOSKI.

1. Systemy diagnostyczne i urządzenia diagnostyczne nadal nie są powszechnie stosowane na statkach handlowych, w tym w odniesieniu do silników okrętowych.
2. Na taki stan rzeczy mają zapewne wpływ koszty systemów diagnostycznych, przy jednoczesnym braku danych o opłacalności ich stosowania.
3. Istotną barierą skutecznego wdrażania systemów diagnostycznych silników okrętowych jest również niedostateczny rozwój metod i algorytmów diagnostycznych dla tych złożonych obiektów technicznych, z uwagi na wysokie nakłady na badania symulacyjne, niezbędne do rozpoznania diagnozowanego obiektu.
4. Przedstawione w opracowaniu wybrane systemy diagnostyczne są dobrym przykładem rozwiązywania zadań diagnostycznych w odniesieniu do silników okrętowych. Należy spodziewać się coraz szerszego ich stosowania, pod warunkiem rozumienia wagi problemu przez armatorów oraz stałego doskonalenia i rozwoju algorytmów i programów diagnostycznych.
5. Efektywność i bezpieczeństwo eksploatacji silników okrętowych mogą być zwiększone przez wdrażanie specjalistycznych urządzeń przeznaczonych do badania wybranych węzłów funkcjonalnych silnika i ich elementów i do badania przebiegu procesu roboczego. W tym kontekście powszechnie powinny być na przykład stosowane stacjonarne indykatory elektroniczne.
6. Tworzenie systemów diagnostycznych powinno być realizowane w ścisłej współpracy z producentami silników, bowiem tylko wówczas możliwe jest zapewnienie odpowiedniej podatności diagnostycznej obiektu.

## LITERATURA.

- [1] Pszczołowski T.: Mała encyklopedia prakseologii, Ossolineum, Wrocław 1978.
- [2] Rozwadowski T.: Diagnostyka techniczna obiektów złożonych, WAT, W-wa, 1983
- [3] Cempel Cz.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1985.
- [4] Włodarski J.K. i inni: Badania rezystancji filmu olejowego za pomocą przyrządu DR-2, WSM-Gdynia 1978 r.
- [5] Foyen .: *Aspects of condition monitoring and maintenance of machinery*. Norwegian Shipping News, 1977, No11C.
- [6] Ostergard A., Fisher P.: *B&W condition check system CC-10 for 2-stroke K-GF diesel engines*. Proceeding of 2-nd IFAC/IFIP Symposium, Washington 1976.
- [7] Berle M.: *Diagnostic system for diesel engines*. Sulzer Technical Review, No 7, 1976
- [8] Chikao Furukawa, Takamasa Matsuo: *Condition monitoring & data loading system (Comos D2)*, Bulletin of the Mar. Soc., Japan 1980.
- [9] Rinichi Sagawa, Yonichi Nakamura: *Development of new diagnosis and trend analysis system for marine diesel engine*, Bulletin of the Mar. Eng. Soc., Japan 1980, vol.8.
- [10] Biuletyn firmy MAN-B&W
- [11] CAPA System Family – biuletyn firmy MAN-B&W
- [12] Fankhauser S., Svimersky K., Węgle M., Oderbolz S.: *Advances in Engine Management Systems*, biuletyn firmy SULZER 1994 r.
- [13] Geist M.: *Sulzer RTA-8T engines: compact two-strokes for tankers and bulk carriers*, Technology Review, Wartsila NSD Switzerland Ltd, 1998 r.
- [14] Prospekt firmowy JOWA i EUB Institut CDS – *Diagnostic Systems*.
- [15] MIP-Calculator NK-100. Technical Information. Autronica.
- [16] Inżynieria diagnostyki maszyn. Pod redakcją B.Żółtowskiego i Cz.Cempla. Biblioteka Problemów Eksploatacji, cz.III,rozd.9 A.Charchalis.
- [17] Polanowski S.: Diagnostyka techniczna okrętowych tłokowych silników spalinowych. Zeszyty Naukowe AMW nr 3, 1991 r.
- [18] Gałęcki W., Tomczak L.: Analizator procesu spalania i wtrysku dla okrętowych silników wysokoprężnych . Zeszyty Naukowe WSM Gdynia, nr 28, 1994 r.
- [19] Tomczak L.: Wykorzystanie pośredniej metody określania położenia wału korbowego w indykatorze elektronicznym. Praca doktorska, PG 2001 r.



Kazimierz WITKOWSKI ur. w 1955 r. Doktor nauk technicznych, adiunkt w Katedrze Siłowni Okrętowych Akademii Morskiej w Gdyni. Jego zainteresowania obejmują zagadnienia z zakresu eksploatacji i diagnostyki okrętowych silników spalinowych.