

**Tomasz Lus**

Akademia Marynarki Wojennej  
Wydział Mechaniczno-Elektryczny, Instytut Budowy i Eksploatacji Okrętów  
81-103 Gdynia, ul. J. Śmidowicza 69  
e-mail: T.Lus@amw.gdynia.pl

## **WSTĘPNE BADANIA DIAGNOSTYCZNE SZYBKOOBROTOWYCH SILNIKÓW O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM NA OKRĘCIE PODWODNYM Z WYKORZYSTANIEM METODY OBWIEDNI DRGAŃ**

### **STRESZCZENIE**

W artykule zostały przedstawione wyniki wstępnych badań diagnostycznych okrętowych tłokowych silników spalinowych typu MB820 stosowanych na okrętach podwodnych (OP) Polskiej Marynarki Wojennej z wykorzystaniem nowej metody bazującej na kątowej analizie obwiedni przyspieszeń drgań. Silniki tego typu nie są wyposażone w zawory indykatorowe, zatem w celu oceny stanu technicznego układów cylindrowych można wykorzystać przebiegi drgań rejestrowane na głowicach cylindrów. W czasie badań czujniki ciśnienia wewnątrzcyldrowego były zamontowane na zaworach dekompresyjnych. Przebiegi ciśnienia były wykorzystywane jako sygnały referencyjne do synchronizacji przebiegów drgań. Wynikiem badań są tzw. dynamiczne fazy rozrządu, wykorzystywane przez specjalistów przy ocenie stanu technicznego i regulacji poszczególnych cylindrów silnika.

Słowa kluczowe:

okrętowe tłokowe silniki spalinowe, diagnostyka, układ paliwowy, układ rozrządu.

### **WSTĘP**

Nowa metoda diagnostyczna była testowana na szybkoobrotowym silniku okrętowym MB820 na OP typu Kobben. Typowe wibroakustyczne metody diagnostyczne

bazujące na analizie amplitudowej lub analizie częstotliwości sygnału drganiowego [1, 5] są wrażliwe na zmiany prędkości obrotowej i obciążenia silnika. Nowa metoda diagnostyczna [4] bazuje na analizie obwiedni sygnału drganiowego w dziedzinie kąta obrotu wału korbowego silnika. Tak zwane „dynamiczne” fazy rozrządu są niezbędne do oceny stanu regulacji silnika. Konwencjonalne metody obsługi i regulacji mechanizmu rozrządu silnika bazują na pomiarach luzów zaworowych oraz kontroli faz rozrządu na kole zamachowym niepracującego silnika. Aby dokonać oceny wartości luzów zaworowych i faz rozrządu na pracującym silniku, trzeba dysponować „dynamicznymi” fazami rozrządu. Wybrane wartości tych parametrów dla silników MB820 przedstawiono w artykule. Polska Marynarka Wojenna eksploatuje cztery OP typu Kobben. Na każdym z nich znajdują się dwa silniki MB820, które napędzają generatory prądu stałego. Metody wibroakustyczne mogą być przydatne w diagnozowaniu właśnie takich złożonych systemów napędowych. Przedstawiono wybrane problemy związane z diagnozowaniem szybkoobrotowego silnika spalinyowego na OP z wykorzystaniem metody wibroakustycznej.

### **OBIEKT BADAŃ — SILNIK MB820/N1**

Silnik MB820 jest dwunastocylindrowym czterosuwowym szybkoobrotowym niedoładowanym silnikiem okrętowym w układzie „V”, w dwóch blokach po sześć cylindrów, o kącie rozchylenia pomiędzy blokami wynoszącym 60 stopni katowych, zwartej i lekkiej budowie [6], którego komora spalania cechuje się występowaniem dodatkowej komory wstępnej. Strona silnika od koła zamachowego jest oznaczana jako tylna. Określenia kierunku obrotów wału korbowego silnika dokonuje się, patrząc na silnik od tylnego końca wału. Gdy wał obraca się zgodnie z ruchem wskazówek zegara, silnik ma „prawy” kierunek obrotów. Numeracja cylindrów w blokach również jest prowadzona od tylnego końca wału. Pierwszy i siódmy cylinder znajdują się przy kole zamachowym silnika, a silnik ma tzw. „lewy” kierunek obrotów. Każdy cylinder ma dwa zawory dolotowe i dwa zawory wylotowe napędzane wspólnym wałkiem krzywkowym poprzez popychacze, dźwignie popychaczy i dźwignie zaworowe. Dwa kolektory wylotowe są połączone z tłumikiem hałasu. Wszystkie pompy niezbędne do pracy silnika — podająca paliwo, olejowa i wody chłodzącej — są zamontowane na silniku i napędzane przez przekładnię zębatą lub pasami klinowymi od jego wału korbowego. Silnik ma dwie pompy wtryskowe

paliwa oddzielne dla poszczególnych bloków. Na pompie lewego bloku zamontowany jest regulator prędkości obrotowej. Pompa wtryskowa prawego bloku ma zamontowaną pompę podającą paliwa napędzaną jedną z krzywek na wałku pompy oraz pompę ręczną podawania paliwa. Tuleje cylindrowe typu mokrego zamocowane w bloku są zamknięte od góry oddzielnymi głowicami mocowanymi do bloku silnika ośmioma śrubami ściągowymi. Każda z głowic cylindrów ma wytoczenie do mocowania za pomocą gwintu komory wstępnej wraz z palnikiem. Powyżej komory wstępnej są umieszczone kanały wody chłodzącej uszczelnione od przestrzeni olejowej azbestową uszczelką. Podstawowe dane techniczne silnika i parametry regulacji układu rozrządu są przedstawione w tabeli 1.

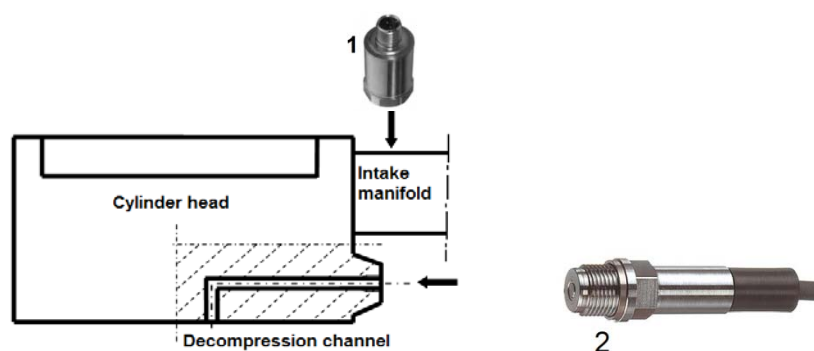
Tabela 1. Podstawowe dane techniczne i fazy rozrządu silnika MB820/N1

Cykl pracy	czterosuwowy niedoładowany
Liczba i układ cylindrów	12 w układzie „V”
Średnica cylindra/skok tłoka	175 mm/205 mm
Całkowita objętość skokowa	59,2 dm <sup>3</sup>
System spalania	Diesel z komorą wstępną
Stopień sprężania	18,5
Prędkość obrotowa mocy znamionowej/ biegu luzem	1400 min <sup>-1</sup> /600 min <sup>-1</sup>
Moc znamionowa ciągła przy 1400 obr/min	440 kW
Kolejność zapłonów	1-8-5-10-3-7-6-11-2-9-4-12
Luz zaworu dolotowego/wylotowego w stanie zimnym	0,40/0,45 mm
Ciśnienie otwarcia wtryskiwacza	17,0–17,5 MPa
Masa suchego silnika	3710 kg
Otwarcie zaworu dolotowego	14° przed GMP
Zamknięcie zaworu dolotowego	56° za DMP
Otwarcie zaworu wylotowego	48° przed DMP
Zamknięcie zaworu wylotowego	19° za GMP
Przykrycie zaworów	33° 14° + 19°
Początek wtrysku paliwa na biegu luzem	24° przed GMP
Zakres zmian automatycznej zmiany kąta wtrysku paliwa	24°–36° przed GMP

*Źródło: opracowanie własne.*

## WYKORZYSTANIE PRZEBIEGÓW CIŚNIENIA WEWNĄTRZCYLINDROWEGO JAKO SYGNAŁU REFERENCYJNEGO

W celu oceny wartości ciśnień wewnątrzcyldrowych okrętowych silników wolno- i średnioobrotowych wyposaża się je w zawory indykatorowe na poszczególnych głowicach cylindrowych. Większość szybkoobrotowych silników okrętowych (łącznie z silnikiem typu MB820), podobnie jak większość silników trakcyjnych, nie jest wyposażona w zawory indykatorowe. W celu pomiaru ciśnienia wewnątrzcyldrowego w silniku MB820 wykorzystano zawory dekompresyjne. W miejsce zaworów dekompresyjnych cylindrów zainstalowano czujniki ciśnienia firmy KISTLER typu 7613B (rys. 1.).



Rys. 1. Głowica cylindra z czujnikiem drgań (1) i ciśnienia cylindrowego (2) mocowanego w miejsce zaworu dekompresyjnego

*Źródło: opracowanie własne.*

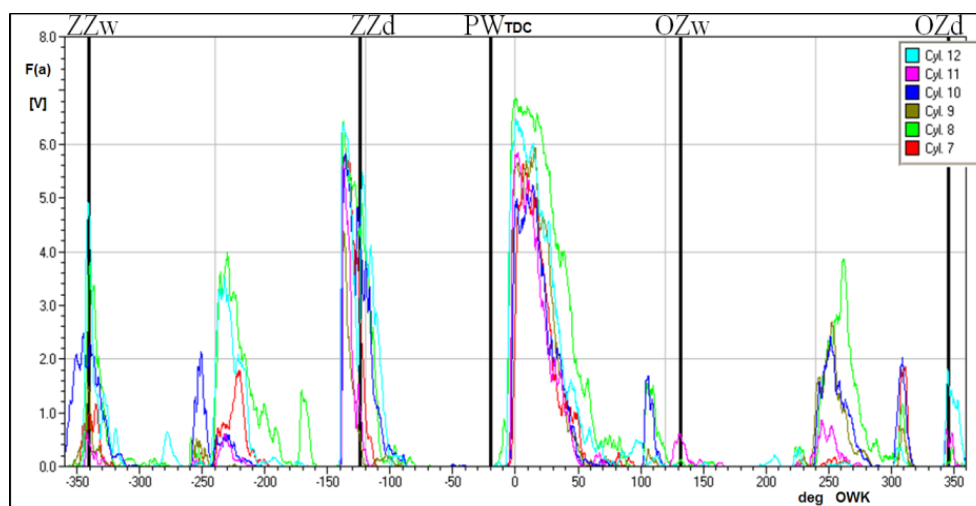
Takie rozwiązanie mogło być zastosowane tylko na dwóch z dwunastu cylindrów silnika w układzie „V” (na cylindrze nr 1 lewego bloku silnika i na cylindrze nr 7 prawego bloku silnika) ze względu na utrudniony dostęp do pozostałych zaworów dekompresyjnych. Czujnik ciśnienia nie powinien być montowany na stałe w miejsce zaworu dekompresyjnego ze względu na niebezpieczeństwo uszkodzenia silnika, szczególnie w czasie rozruchu. Wybrany fragment zarejestrowanych w czasie badań przebiegów ciśnienia był wykorzystywany jako sygnał referencyjny (wyzwalający) do synchronizacji zapisu przebiegów drgań z poszczególnych sześciu cylindrów w każdym z dwóch bloków silnika. Czujniki drgań były montowane na kolektorze dolotowym powietrza przy każdej z głowic cylindrowych, jak to pokazano na rysunku 1.

## WYNIKI BADAŃ

Typowe metody wizualnej analizy sygnału drganiowego w dziedzinie czasu/kąta obrotu wału dają zwykle ograniczoną ilość informacji. Metoda prezentowana w artykule polega na analizie, w zależności od kąta obrotu wału korbowego, obwiedni sygnału przyspieszeń drgań generowanych przez układy funkcjonalne pracującego silnika. Została ona opracowana w Akademii Marynarki Wojennej dla silników wolno-, średnio- i szybkoobrotowych i jest ciągle rozwijana dla nowych typów silników okrętowych. Sygnał w tej metodzie jest analizowany jedynie jako zdarzenie na osi czasu/kąta obrotu wału korbowego. Przy dostatecznie wysokiej częstotliwości próbkowania oraz stabilnej osi czasu/kąta, mając właściwy sygnał referencyjny, można stosunkowo łatwo wyznaczyć charakterystyczne dla pracującego silnika punkty z przebiegu obwiedni przyspieszeń drgań. Właściwa kolejność występowania odpowiednich sygnałów drganiowych (właściwy charakter przebiegu sygnału drganiowego) oznacza, że silnik jest w dobrym stanie technicznym. W przypadku silników wielocylindrowych, gdy trzeba analizować jednocześnie wiele nakładających się na siebie sygnałów drganiowych, mogą wystąpić problemy z interpretacją wyników badań. Sygnały drganiowe zarejestrowane jednocześnie na głowicach sześciu cylindrów jednego z bloków dwunastocylindrowego silnika MB820 zostały przesunięte (dosunięte) do GMP pierwszego cylindra w danym bloku w celu ułatwienia i zwiększenia dokładności dalszej ich analizy. Jako znacznik GMP został wykorzystany fragment przebiegu ciśnienia wewnątrzcyldrowego.

W przypadku dosunięcia przebiegów drgań do GMP pierwszego cylindra w danym bloku, wzór przebiegu drgań daje operatorowi analizatora możliwość rozpoznania charakterystycznych punktów na wykresie faz rozrządu. Dla silników MB820 istnieje możliwość odczytywania określonych kątów odpowiadających występowaniu impulsów drganiowych również na biegu jałowym silnika, co jest zaskakującą i bardzo cenną informacją uzyskaną w czasie badań wstępnych.

Używając analizatora przebiegów drgań, który jest wyposażony w specjalną funkcję „zoom” (co zostało przedstawione na rys. 3.), każdą część przebiegu można powiększyć i odczytać parametry dynamicznych faz rozrządu silnika.

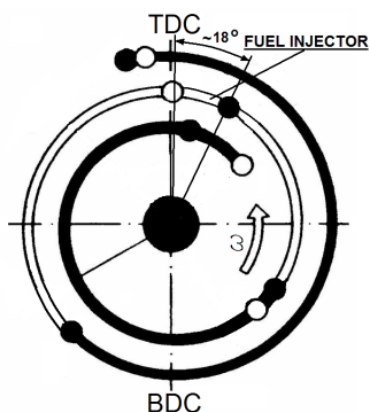
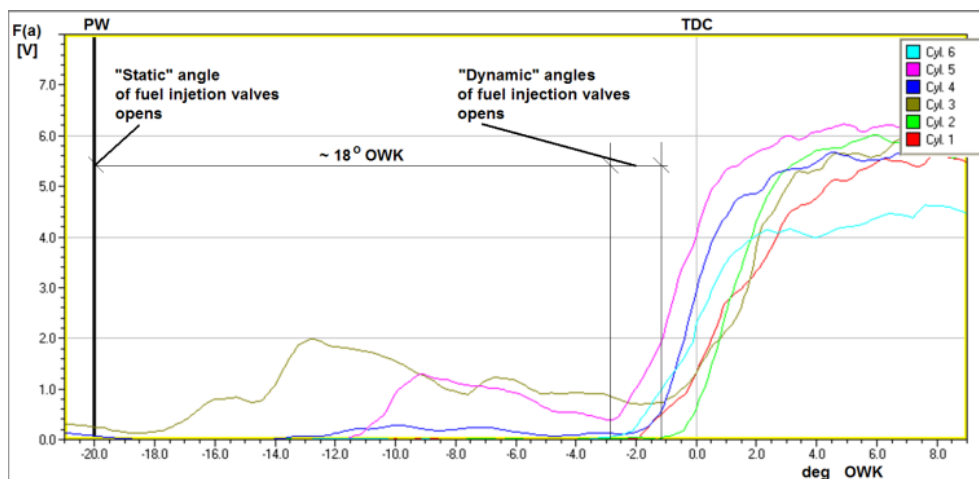


Rys. 2. Przebiegi drgań z sześciu głowic cylindrów tego samego bloku silnika MB820 przesunięte (dosunięte) do GMP pierwszego cylindra w bloku — silnik obciążony nominalnie. Pionowe linie oznaczają odpowiednio wartości kątów: ZZw — statycznego zamknięcia zaworów wylotowych, ZZd — statycznego zamknięcia zaworów dolotowych, PW — statycznego początku wtrysku paliwa, OZw — statycznego otwarcia zaworów wylotowych, OZd — statycznego otwarcia zaworów dolotowych

Źródło: opracowanie własne.

Używając kursora, operator analizatora może określić kąty początku otwarcia wtryskiwaczy paliwa oraz kąty zamknięcia i otwarcia zaworów dolotowych i wylotowych danego cylindra w danym bloku silnika z wystarczającą do regulacji (czy sprawdzenia stanu regulacji) dokładnością.

Wybrane wyniki badań silnika MB820 z użyciem tej metody są przedstawione na rysunku 3. i w tabeli 2. Z lewej strony rysunku przedstawiono powiększone (za pomocą funkcji „zoom”) fragmenty przebiegów obwiedni przyspieszeń drgań w charakterystycznych punktach obiegu. Z prawej strony rysunku przedstawiono „dynamiczny” (białe puste kropki) i „statyczny” (czarne pełne kropki) kołowy wykres faz rozrzędu silnika. Przedstawiono również różnice pomiędzy wartościami „statycznych” i „dynamicznych” faz rozrzędu. Zmierzone wartości kątów „dynamicznych” faz rozrzędu i różnice pomiędzy wartościami średnimi dla lewego (cyl. 1–6) i prawego bloku (cyl. 7–12) silnika obciążonego i na biegu jałowym przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 3. Dynamiczne i statyczne wartości kątów początku wtrysku paliwa w silniku MB820

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 2. Wartości średnie kątów „dynamicznych” faz rozrządu dla lewego (1–6 cyl.) i prawego (7–12 cyl.) bloku silnika MB820 obciążonego i na biegu jałowym

Wartość średnia/blok	Obciążenie znamionowe silnika				Bieg jałowy		
	ZZw [°]	ZZd [°]	Pw [°]	OZd [°]	ZZw [°]	ZZd [°]	Pw [°]
średnia 1–6	-343,5	-138,5	-1,5	308,2	-349,6	-139,0	0,6
średnia 7–12	-344,9	-139,7	-5,0	304,1	-345,9	-133,8	-0,7

Źródło: opracowanie własne.

## WNIOSKI

Ocena stanu technicznego silników spalinowych jest bardzo złożonym procesem. Większość uszkodzeń i zakłóceń w pracy silników jest generowana przez układ paliwowy i układ rozrządu czynnika roboczego. Zgodnie z instrukcjami, obsługa jest zobowiązana do stosunkowo częstego kontrolowania stanu technicznego tych i innych układów silnika.

Otwieranie i zamykanie się wtryskiwaczy paliwa, otwieranie i zamykanie się zaworów dolotowych i wylotowych silnika jest źródłem sygnałów drganiowych, których propagacja następuje w całej strukturze silnika. Istnieje szereg narzędzi pozwalających analizować zmiany charakteru przebiegów sygnałów drganiowych w systemach monitoringu stanu technicznego urządzeń w czasie rzeczywistym. Zaprezentowana specjalna metoda obróbki sygnałów drganiowych daje możliwość zmiany sposobu dokonywania obsługi profilaktycznych silników [2, 3] z dotychczas stosowanej metody według liczby przepracowanych godzin na metodę według stanu technicznego, bez obawy o uszkodzenie pracującego silnika. Tak zwane „dynamiczne” fazy rozrządu można zarejestrować, stosując odpowiednią obróbkę sygnału. Zarejestrowane dynamiczne kąty faz rozrządu różnią się od tzw. kątów „statycznych” faz rozrządu podawanych w instrukcji obsługi silnika. Kąty określane statycznie nie mogą być przydatne w obsługach profilaktycznych z wykorzystaniem analizatora pracy silnika. Wynika z tego konieczność tworzenia bazy danych dynamicznych wartości faz rozrządu. Na wartości kątów dynamicznych faz rozrządu silników wpływa prędkość obrotowa i obciążenie silnika. Biorąc pod uwagę fakt, że badania silnika mogą się odbywać w różnych warunkach obciążenia, konieczne jest posiadanie zarejestrowanych parametrów dla szerokiego spektrum obciążeń silnika.

W trakcie badań wstępnych nie zarejestrowano wszystkich charakterystycznych punktów kołowego wykresu rozrządu. Nie uzyskano z dostateczną dokładnością dynamicznych kątów otwarcia zaworów wylotowych. Prawdopodobnie było to spowodowane faktem, że zawory wylotowe znajdują się blisko osi symetrii silnika, a czujniki drgań były montowane na zewnątrz silnika na kolektorze dolotowym powietrza. Dodatkowo nie zarejestrowano sygnałów drganiowych od zamknięcia wtryskiwaczy, gdyż sygnał od ich otwarcia przy stosowanym sposobie filtracji zanika dłużej, niż trwa okres wtrysku. Aby uzyskać lepsze wyniki badań, wydaje się, że czujniki drgań powinny być montowane do silnika na wkręty lub przyklejane — mocowanie magnetyczne czy dociskanie czujnika ręką nie pozwala uzyskać pełnego spektrum drgań (1–3) kHz. Ponadto w trakcie badań stwierdzono, że czujnik drgań powinien mieć wyższą częstotliwość drgań własnych. Filtr górnoprzepustowy powinien mieć zmieniony zakres, a filtr obwiedniowy zmienioną stałą czasową.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Batko W., Dąbrowski Z., *Nowoczesne metody badania procesów wibroakustycznych*, Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji — PIB, Radom 2006.
- [2] Bengtsson M., *Condition Based Maintenance System Technology — Where is Development Heading?*, Euromaintenance 2004 — Proceedings of the 17th European Maintenance Congress, 11th — 13th of May, 2004, AMS (Spanish Maintenance Society), Barcelona 2004.
- [3] Klockars T., Eykerman A., Mayr I., *Making the most of perfect maintenance timing*, 'Wärtsilä Technical Journal', 01.2010, pp. 57–60.
- [4] Lus T., *Tunnig method for high-speed marine Diesel engine MB820 type*, 'Journal of Kones Powertrain and Transport', 2010, Vol. 17, No 2, pp. 277–284.
- [5] Madej H., *Diagnozowanie uszkodzeń mechanicznych w silnikach spalinowych maskowanych przez elektroniczne urządzenia sterujące*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji — PIB, Radom 2009.
- [6] *Marine diesel engine MB 820N/1type manual*, MERCEDES-BENZ.
- [7] Wimmer A., Glaser J., *Engine Indication*, Institute of Technique Application Publisher, Warsaw 2004.

## PRELIMINARY DIAGNOSTIC TESTS ON SUBMARINE HIGH-SPEED MARINE DIESEL ENGINE USING ENVELOPE VIBRATION METHOD

### ABSTRACT

Checking and tuning of the fuel injection valves opening pressures, fuel valves timing and exhaust or inlet valves clearances is a common practice in high-speed marine diesel engines maintenance. Cost lowering tendency in engine maintenance schedules and unmanned vessel's propulsion plants need new approach to these old and reliable procedures. Dynamic valve gear timing diagrams are indispensable to perform an accurate engine tuning. A new original diagnostic and tuning method for high-speed marine diesel engine MB820 type is presented in the paper.

In the principle this method based on measurements of: internal cylinder pressure curves and on vibration signals. Typical diagnostic methods which based on vibration signals analysis are sensitive to engine load and speed changes. Tests presented in this paper were focused on the possibilities and differences of the dynamic timing diagram assessing at engine rated load and when idling.

Keywords:

marine diesel engine, diagnostics, fuel injector, valve gear.