

ONE-CYLINDER MARINE RESEARCH DIESEL ENGINE

Tomasz Lus

Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów, Akademia Marynarki Wojennej

81-103 Gdynia ul. Śmidowicza 69, Poland

tel.: +48586262629, e-mail: Tomasz.lus@wp.pl

Abstract

Initial project of one-cylinder high-speed marine diesel engine is presented in this paper. Basic platform for this engine rebuilding was Polish manufactured WOLA DM 150 six cylinders marine diesel engine. Main concern is focused on changes in valve train mechanism and fuel injection system. Naval University in Gdynia for many years carries scientific-investigative works from the range of the operation of shipping piston-combustion engines. They there refer processes reaching in cylinders of the engine as and processes accompanying to them. Main investigative themes at present performed in the Institute of Design and Operation of Battleships of the area of piston engines refer: research of the course of the pressure of the combustion in the cylinder with multi symptom analysis of this parameter for the implementation in the diagnostics and research of the influence of different factors on the toxicity of combustion gases.

The idea system of the timing gear distribution with the hydraulic drive of valves, the idea of the fuel injection system, as well as the verification stand along with entrance tests are presented in the paper.

Keywords: *combustion engines, valve train, fuel system, hydraulic control*

JEDNOCYLINDROWY BADAWCZY OKRĘTOWY SILNIK SPALINOWY

Streszczenie

W referacie został przedstawiony wstępny projekt stanowiska silnika 1-cylindrowego budowanego na bazie silnika WOLA 150 DM. Przedstawiono propozycję przebudowy układu napędu rozrządu zaworowego oraz wtrysku paliwa. Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni od lat prowadzi prace naukowo-badawcze z zakresu eksploatacji okrętowych tłokowych silników spalinowych. Dotyczą one procesów zachodzących w cylindrach silnika jak i procesów im towarzyszących. Główne tematy badawcze aktualnie prowadzone w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów z obszaru silników tłokowych dotyczą: badania przebiegu ciśnienia spalania w cylindrze wraz z wielo symptomową analizą tego parametru do wykorzystania w diagnostyce oraz badania wpływu różnych czynników na toksyczność spalin.

Koncepcja układu rozrządu zaworowego z napędem hydraulicznym zaworów, koncepcja układu wtrysku paliwa, jak również weryfikacja stanowiska wraz z próbami są prezentowane w artykule.

Słowa kluczowe: *silniki spalinowe, rozrząd zaworowy, wtrysk paliwa, hydrauliczne sterowanie*

1. Wstęp

Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni od lat prowadzi prace naukowo-badawcze z zakresu eksploatacji okrętowych tłokowych silników spalinowych. Dotyczą one procesów zachodzących w cylindrach silnika jak i procesów im towarzyszących. Główne tematy badawcze aktualnie prowadzone w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów z obszaru silników tłokowych

dotyczą: badania przebiegu ciśnienia spalania w cylindrze wraz z wielosymptomową analizą tego parametru do wykorzystania w diagnostyce oraz badania wpływu różnych czynników na toksyczność spalin.

Dotychczas prace naukowo-badawcze prowadzone są w oparciu o bazę, na którą składają się głównie stanowiska badawcze okrętowych średnio- i szybkoobrotowych silników SULZER typu 6AL20/24, WOLA-HENSCHEL typu 57H6Aa oraz SW400 Leyland. Pomimo niewątpliwych zalet wyżej wymienionych stanowisk, do których zaliczyć można reprezentatywność obiektów (typowe silniki, powszechnie wykorzystywane w okrętownictwie i Marynarce Wojennej), stanowiska te posiadają wadę, która w dobie przeznaczania ograniczonych środków finansowych na realizację badań naukowo-badawczych wydaje się istotna. Wadą tą jest bez wątpienia wysoki koszt jednostkowy prowadzenia badań, związany przede wszystkim z wielkością obiektów. Ponadto w przypadku silników sześciocylindrowych (a z takimi mamy do czynienia) sygnał parametru wyjściowego pochodzący od jednego cylindra jest z reguły zakłócany oddziaływaniem pozostałych cylindrów. Stanowi to istotne utrudnienie na etapie identyfikacji badanego zjawiska, czy też weryfikacji opracowywanych modeli matematycznych tychże zjawisk na obiekcie rzeczywistym.

W związku z powyższym rozpoczęto budowę stanowiska badawczego silnika jednocylindrowego, opartego o konstrukcję silnika typu WOLA 150 DM. Wybór silnika tego typu jako bazy do budowy stanowiska podyktowany jest przede wszystkim reprezentatywnością obiektu (silnik ten jest wykorzystywany w okrętownictwie), posiadaniem układu bezpośredniego wtrysku paliwa oraz otwartej komory spalania, podobnie jak większość silników o zastosowaniu morskim. Moc 6-cio cylindrowego silnika WOLA 150 DM wynosi 110 kW przy prędkości obrotowej 1500 obr/min. Średnica cylindra jest równa 150 mm a skok tłoka wynosi 180 mm. Istotnym jest również fakt posiadania pewnej liczby silników tego typu, ich zestawów naprawczych. Prace związane z cięciem, spawaniem oraz przebudową silnika 6-cio cylindrowego na silnik 1-dno cylindrowy wykonano we współpracy ze Stoczną Marynarki Wojennej w Gdyni.

Budowane stanowisko badawcze przewiduje się wyposażać między innymi w:

- układ doładowania silnika sprężarką napędzaną niezależnie (dzięki temu uzyskane ciśnienie spalania będzie w zakresie 8,0 – 10,0 MPa);
- hamulec z układem automatycznego sterowania obciążeniem silnika;

Silnik jednocylindrowy zbudowany w ramach projektu ma mieć charakter doświadczalno-dydaktyczny. Ma umożliwiać prowadzenie badań z zakresu doskonalenia metod diagnostycznych silników, analizy toksyczności spalin jak i prowadzenie innych badań w ramach realizacji prac dyplomowych słuchaczy. Silnik będzie również wykorzystywany w zajęciach dydaktycznych. Ambicją zespołu przebudowującego silnik jest wyposażenie go w układy będące już standardem w niektórych zastosowaniach trakcyjnych a dopiero wchodzące na jednostki napędowe okrętów. Planuje się zastosowanie, obok tradycyjnego układu wtryskowego paliwa, możliwości zasilania silnika w systemie CR. W tym celu planuje się wykorzystać gotowe elementy układów zasilania paliwem typu CR z samochodowych silników trakcyjnych. Również układ rozrządu zaworowego silnika planuje się wykonać w dwóch wariantach: układ konwencjonalny z dwoma wałami krzywkowymi nad głowicą i układ z hydraulicznym otwieraniem zaworów. W ramach referatu zostaną zaprezentowane do dyskusji wstępne koncepcje tych dwóch układów przebudowywanego silnika.

2. Koncepcja układu rozrządu zaworowego z napędem hydraulicznym zaworów

Istniejący układ zaworowy silnika WOLA 150 nie stwarza możliwości zmiany faz rozrządu w czasie pracy silnika. Jest to konwencjonalny układ górnozaworowy z dwoma wałami krzywkowymi nad głowicą. Prace rozwojowe współczesnych silników okrętowych zmierzają w kierunku swobodnego kształtowania faz rozrządu silnika, a jednym z popularniejszych rozwiązań

w tym względzie jest stosowanie układu z napędem hydraulicznym zaworów i sterowaniem elektronicznym [1]. Znane są różne koncepcje tego typu układów np. układy rozrządu zaworowego z możliwością zmiany faz rozrządu w czasie pracy z napędem hydraulicznym i sterowaniem elektronicznym – firmy Lotus [4].

Napęd i regulacja faz rozrządu Lotusa – AVT (Active Valve Train) zapewnia możliwość ciągłej regulacji faz rozrządu oraz skoku zaworów. Rozwiązanie to charakteryzuje między innymi brak wałka rozrządu, krzywek i części przenoszących napęd na zawór. Nie posiada on sprężyn zamykających zawory. Zawory w eksperymentalnym 1-cylindrowym stacjonarnym benzynowym silniku Lotusa, są napędzane hydraulicznymi siłownikami, o obustronnym działaniu. Dzięki takiemu rozwiązaniu istnieje łatwość regulacji faz otwarcia i zamknięcia zaworów, oraz ich skoków. Siłownik hydrauliczny uruchamiający zawór, umieszczony jest nad trzonkiem zaworu, współosiowo z nim. Umieszczenie w ten sposób tych elementów, ułatwia sterowanie i kontrolę położenia zaworu. Chwilowe położenie zaworu jest informacją niezbędną dla działania mikroprocesora sterującego rozrządem silnika. Silnik badawczy Lotusa, w którym zastosowano hydrauliczny napęd rozrządu, jest 1-cylindrowy, 4-zaworowy. Zbudowano go z części silnika 4-cylindrowego o pojemności 2200 cm³, wykorzystując dwa cylindry w celu zapewnienia częściowego wyrównoważenia. W drugim cylindrze, który nie pracuje, umieszczony jest tłok z korbowodem, ale bez pierścieni. W próbach okazało się, że oprogramowanie umożliwiło precyzyjne sterowanie rozrządem. Można było zmieniać kąty otwarcia i zamknięcia zaworów co 1° obrotu wału korbowego. Skoki zaworów zmieniano w czasie prób w sposób ciągły od 0 do 11 mm. Możliwe też było rozdzielenie sterowania grupami zaworów, np. wlotowymi niezależnie od wylotowych. Zaobserwowano wpływ zmian wartości kątowych faz rozrządu na osiągi silnika. Przy prędkości obrotowej 2000 obr/min błędy rzędu $\pm 1^\circ$ zmieniały osiągi silnika. Około 4000 obr/min wartość dopuszczalnego błędu faz rozrządu wzrastała do $\pm 3^\circ$.

Podobne rozwiązanie napędu zaworów, do projektu firmy LOTUS, w silnikach dwusuwowych dużych mocy stosowane jest przez firmy MAN B&W w silnikach serii ME - C oraz Wärtsilä w silnikach serii RTA i RT – flex. Tu jednak zawory są otwierane hydraulicznie i zamykane pneumatycznie a prędkość obrotowa silnika jest bardzo niska.

Alternatywą dla układów hydraulicznych są układy rozrządu zaworowego z możliwością zmiany faz w czasie pracy z napędem elektromagnetycznym i sterowaniem elektronicznym, jednak takie rozwiązania dotyczą najczęściej małych silników szybkoobrotowych. Przykładem może być konstrukcja elektromagnetycznie sterowanego układu rozrządu, pozbawionego wału rozrządu, dźwigni, popychaczy itd. firmy Arura System Incorporation z USA oraz podobne rozwiązanie napędu zaworów, opracowane przez polskich naukowców [4].

Istnieje wiele rozwiązań układów zaworowych jak i stosowanych sposobów ich napędu. Obserwując tendencje rozwojowe sposobu napędu zaworów silników okrętowych można wnioskować, że coraz więcej nowych konstrukcji silników będzie posiadać napęd zaworów ze zmiennymi fazami rozrządu w celu uzyskiwania przez te silniki jak najlepszych osiągnięć. Prowadzone badania jak i już istniejące rozwiązania potwierdzają słuszność stosowania zmiennych faz rozrządu zaworowego w tłokowych silnikach spalinowych. Obecnie większość silników wysokoprężnych stosowanych w okrętownictwie nie posiada zmiennych faz rozrządu, dlatego istotne wydaje się prowadzenie badań na silniku, na którym w dowolny sposób można zmieniać fazy rozrządu i badać hydrauliczny napęd zaworów w celu jego doskonalenia oraz wykrywania jego wad, by w efekcie zastosować go w konstrukcjach silników budowanych seryjnie.

Do projektu przebudowy silnika WOLA 150 planuje się wybrać napęd hydrauliczny zaworów, gdyż posiada on pewne zalety, takie jak:

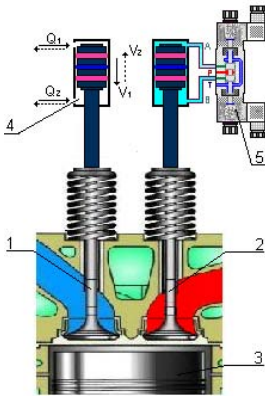
- możliwość przekazywania dużej mocy;
- elementy układu mają dużą zwartość konstrukcji;

- mała masa elementów ruchomych umożliwia rozwijanie dużych prędkości ruchu zaworów w krótkim czasie;
- naturalny sposób tłumienia drgań pojawiających się w układzie dzięki właściwościom czynnika hydraulicznego;
- bezpośrednie osiowe przekazywanie ruchu tłoczyska siłownika na trzon zaworu a tym samym wyeliminowanie sił bocznych w prowadnicy zaworu;
- przy zastosowaniu pompy hydraulicznej z niezależnym napędem od silnika spalinowego możliwość dowolnego sterowania ciśnieniem i strumieniem objętości czynnika hydraulicznego.

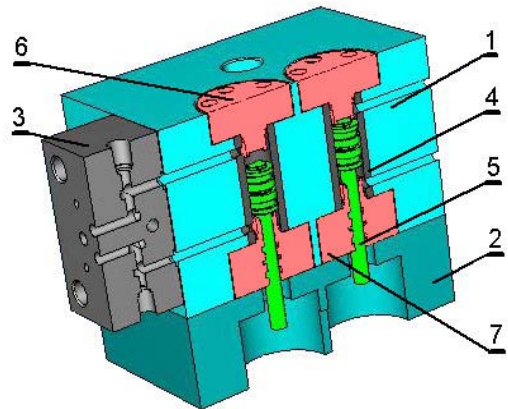
Projektowany układ rozrzędu powinien umożliwiać:

- dowolne kształtowanie faz rozrzędu w zależności od obciążenia i prędkości obrotowej silnika;
- pozostawienie układu zaworów i gniazd zaworowych oraz kanałów dolotowych i wylotowych czynnika roboczego w niezmiennym kształcie;
- przyjęcie do obliczeń możliwie dużej liczby elementów obecnego układu rozrzędu i obecnie stosowanych faz rozrzędu jako bazy wyjściowej.

Na dzień dzisiejszy nie zdecydowano jeszcze definitywnie o sposobie zamykania zaworów. Rozważana jest opcja z hydraulicznym otwieraniem i zamykaniem zaworów, z ich hydraulicznym otwieraniem i pneumatycznym zamykaniem oraz z hydraulicznym otwieraniem z zamykaniem za pomocą sprężyn, jak to przedstawiono na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1 Schemat hydraulicznego napędu zaworów
1- zawór dolotowy, 2 – zawór wylotowy, 3 – cylinder,
4 – siłownik hydrauliczny, 5 – suwak sterujący
Fig. 1 Diagram of hydraulic valve train
1 – inlet valve, 2 – exhaust valve, 3 – cylinder,
4 – hydraulic piston, 5 – controll device



Rys.2 Nakładka na głowicę z układem hydraulicznym
1 – nakładka górna; 2 – nakładka dolna;
3 – blok redukcyjny; 4 – cylinder; 5 – tłok;
6 – pokrywa górna; 7 – pokrywa dolna.
Fig. 2 Cylinder head cover with hydraulic elements
1- top block, 2 – bottom block, 3 – reduction block,
4 – cylinder, 5 – piston, 6 – top cover, 7 – bottom cover

3. Koncepcja układu wtrysku paliwa

W układach konwencjonalnych wtrysku paliwa z pompami rzędownymi i rozdzielcowymi zwykle występuje wyłącznie wtrysk główny, nie ma wtrysku wstępnego oraz kontrolowanego dotrysku. Wyjątek stanowią np. układy z wtryskiwaczami o dwóch rzędach otworków w

rozpylaczu. W układach takich wytwarzanie ciśnienia oraz odmierzanie dawki paliwa do wtrysku za pomocą krzywki i tłoczka są sprzężone, czego konsekwencją jest to, że:

- ciśnienie wtrysku i dawka paliwa wzrasta wraz ze wzrostem prędkości obrotowej silnika,
- w trakcie trwania wtrysku wzrasta jego ciśnienie, które maleje po zakończeniu wtrysku do wartości ciśnienia otwarcia wtryskiwacza.

Następstwem tego jest fakt, że małe dawki paliwa wtryskiwane są z mniejszym ciśnieniem a ciśnienie maksymalne wtrysku jest niższe niż podwójna wartość średniego ciśnienia wtrysku. Między innymi te niedostatki konwencjonalnych układów wtryskowych są szczególnie odczuwalne w silnikach szybkoobrotowych pracujących na małych obciążeniach i z małymi prędkościami obrotowymi. Taki charakter obciążeń jest typowy dla jednostek pływających wyposażonych w silniki WOLA 150 i podobne. Szybkoobrotowe silniki 6 WOLA 150 DM stosowane są w Marynarce Wojennej jako silniki napędu głównego małych jednostek pływających oraz jako silniki pomocnicze. Sposobem na poprawę osiągnięć takich silników może być zastosowanie układu wtrysku paliwa typu Common Rail – CR.

Tak zwany idealny układ wtrysku paliwa, w porównaniu z konwencjonalnym, powinien spełniać między innymi następujące dodatkowe wymagania:

- ciśnienie i dawka wtrysku powinny być ustalone niezależnie dla każdego punktu pracy silnika określonego prędkością obrotową i obciążeniem,
- podczas zwłoki zapłonu, między początkiem wtrysku i początkiem spalania, dawka powinna być jak najmniejsza.

Wymagania te spełnia układ wtryskowy typu Common Rail. W układzie takim ciśnienie wtrysku wytwarzane jest niezależnie od prędkości obrotowej wału korbowego silnika oraz dawki wtryskiwanego paliwa. Cechą charakterystyczną układy wtryskowe typu Common Rail jest wspólny kanał przepływowy (gdzie magazynowane jest paliwo pod wysokim ciśnieniem) połączony przewodami paliwowymi z wtryskiwaczami, w których umieszczono elektromagnetyczne zawory. Projekt przebudowy silnika zmierza do zastąpienia dotychczasowego konwencjonalnego układu paliwowego układem typu CR.

Założenia do budowy układu zasilania paliwem typu CR silnika WOLA 150 bazują na dobraniu odpowiedniego wtryskiwacza sterowanego elektronicznie z silnika samochodu ciężarowego i dopasowaniu pozostałych elementów układu zasilania. Oprogramowanie i układ sterowania pracą wtryskiwacza i zaworów zostaną wykonane we własnym zakresie. Rozważana jest możliwość wykorzystania niektórych elementów dotychczasowego układu paliwowego w nowo budowanym stanowisku silnika jednocylindrowego.

4. Próby silnika na hamowni.

Do tej pory, w ramach realizacji projektu dokonano przebudowy silnika 6-cio cylindrowego na 1-dno cylindrowy. Wymagało to dokonaniem zmian konstrukcyjnych w wielu układach silnika.

Po zmontowaniu silnika wraz z prądnicą na ramie fundamentowej, wykonaniu niezbędnych instalacji silnikowych oraz regulacji statycznej silnika zdecydowano o sprawdzeniu silnika w działaniu na hamowni w Stoczni Marynarki Wojennej. Próby silnika wraz z prądnicą obciążającą przebiegły pomyślnie. W ich trakcie silnik pracował w układzie konwencjonalnym, ze zmienionym układem korbowym wyposażonym w dwa przeciwcieżary na ramionach korb wału korbowego. Po próbach pobrano olej silnikowy do analizy. Wyniki badania oleju również są zadowalające. Po próbach silnik wraz z prądnicą został przetransportowany do Laboratorium Eksploatacji Siłowni Okrętowych Akademii Marynarki Wojennej. Silnik gotowy do montażu w laboratorium przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3 Silnik po próbach gotowy do montażu na stanowisku w laboratorium
 Fig. 3 Engine after tests in shipyard prepare to fix on laboratory test bed

5. Uwagi końcowe

Największe trudności projektowe dotyczące układu hydraulicznego napędu zaworów związane są z pozyskaniem odpowiednio szybkich suwaków sterujących, których czas reakcji byłby właściwy dla silników średnio- i szybkoobrotowych. Przedstawione w referacie założenia budowy stanowiska silnika 1-cylindrowego mają charakter wstępny i są przedstawiane pod dyskusję w celu zebrania możliwie największej ilości uwag i sugestii w celu dalszego doskonalenia projektu budowanego stanowiska. W referacie najwięcej uwagi poświęcono projektom zmian w układzie rozrządu zaworowego i w układzie zasilania paliwem. W związku z prowadzonymi od wielu lat w Instytucie badaniami przebiegu ciśnienia spalania w cylindrze oraz badaniami wpływu różnych czynników na toksyczność spalin emitowanych przez silniki okrętowe, budowane stanowisko zostanie również przystosowane do tego typu badań.

Literatura

- [1] Aaltonen J., Vilenius M., *Electrohydraulic valvetrain for extreme value diesel engine*, Tampere University of Technology, Institute of Hydraulics and Automation, Tampere, Finland, Internet, 2003.
- [2] Brader J.S., *Development of a Piezoelectric Controlled Hydraulic Actuator for a Camless Engine*, University of South Carolina, 2001.
- [3] *Elektroniczne sterowanie silników wysokoprężnych. Układ wtryskowy Common Rail*,
- [4] WKŁ, Warszawa 2000.
- [5] Kosowski, Z., Wajand J., A., Zbierski, K., *Analiza sposobów elektromagnetycznego napędzania zaworów rozrządu tłokowego silnika spalinowego*, Journal of KONES Internal Combustion Engines, Warszawa - Gdynia 2001.
- [6] Sułek M., *Regulacja faz rozrządu*, Auto Technika Motoryzacyjna. Lipiec 1994.
- [7] Wajand J.A., *Doświadczalne tłokowe silniki spalinowe, WN-T*, Warszawa 2003.