

## MODYFIKACJA UKŁADU DO POMIARU PRZEBIEGU CIŚNIENIA SPALANIA OKRĘTOWEGO SILNIKA TŁOKOWEGO SULZER AL25/30

### MODIFICATION OF THE SYSTEM FOR MEASURING COMBUSTION PRESSURE IN THE SHIP PISTON ENGINE SULZER AL25/30

**Jacek Wysocki**

Uniwersytet Morski w Gdyni, Morska 81-87, 81–225 Gdynia, Wydział Mechaniczny, Katedra Siłowni Okrętowych, e-mail: j.wysocki@wm.am.gdynia.pl, ORCID 0000-0001-9933-9028

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia wybrane problemy analizy przebiegów ciśnień cylindrowych w okrętowych silnikach tłokowych. Prawidłowo sporządzony i przeanalizowany wykres indykatorowy pomaga w formułowaniu wniosków diagnostycznych, za pomocą których można doprowadzić do optymalnej, pod kątem ekonomicznym i ekologicznym, regulacji silnika okrętowego. Pomiary ciśnień cylindrowych zaliczane są do trudnych, a także obciążonych wieloma błędami, dlatego też głównym tematem artykułu jest przedstawienie nowej koncepcji pomiarów przebiegów ciśnień cylindrowych.

**Słowa kluczowe:** indykowanie, wykresy indykatorowe, średnie ciśnienie indykowane, maksymalne ciśnienie spalania, ciśnienie cylindrowe, diagnostyka, okrętowe silniki tłokowe.

**Abstract:** The article presents selected problems regarding the correct analysis of cylinder pressures in ship piston engines. Correctly prepared and the analyzed indicator diagram helps in formulating appropriate diagnostic conclusions, with the help of which it is possible to achieve the optimal, in economic and environmental terms, regulation of the ship's engine. Cylinder pressure measurements are classified as difficult and also burdened with many errors. Therefore, the main topic of the article is to present a new concept for cylinder pressure measurements.

**Keywords:** indication, indicator diagrams, average indicated pressure, maximum combustion pressure, cylinder pressure, diagnostics, marine piston engines.

## 1. WSTĘP

Transport morski stanowi najbardziej ekonomiczny i efektywny sposób przewożenia towarów. Dotyczy to przede wszystkim transportu międzynarodowego, a głównie międzykontynentalnego. Niezależnie od typu statku ta forma przewozu towarów pod

wieloma względami przewyższa inne, co jest rzadko kwestionowane. Jednakże rosnące ceny paliw ropopochodnych, powszechnie stosowanych na statkach morskich, oraz rosnące wymagania ekologiczne zmuszają armatorów do podejmowania działań, ograniczających zużycie paliwa oraz zmniejszających emisję gazów do atmosfery, w tym cieplarnianych. Emisja gazów cieplarnianych jest proporcjonalna do zużycia paliwa, stąd im mniejsze jest jego zużycie, tym mniejsza będzie emisja gazów cieplarnianych. Instytucje międzynarodowe, w tym przede wszystkim Międzynarodowa Organizacja Morska (IMO), poprzez kolejne akty prawne wymuszają nie tylko konieczność bezpiecznej eksploatacji floty, ale także dbałość o środowisko naturalne. W ostatnich latach mówi się również o efektywności energetycznej w różnych stanach eksploatacyjnych statku. Efektywność energetyczna jest odwrotnie proporcjonalna do zużycia paliwa. Wszystkie te działania w ramach ograniczania emisji gazów cieplarnianych, w tym głównie dwutlenku węgla, zmierzają do optymalnego ze względu na to kryterium, projektowania i budowy statków, a następnie ich eksploataowania. Na poprawę efektywności energetycznej siłowni okrętowej ma wpływ nie tylko minimalne zużycie paliwa, ale także dbałość o dobry stan techniczny siłowni. Tu zaś istotne znaczenie ma prawidłowo prowadzony proces diagnostyczny.

Współcześnie stosowane silniki okrętowe są to najczęściej spalinowe silniki tłokowe. Wśród nich występują głównie silniki o zapłonie samoczynnym – dwusuwowe lub czterosuwowe. Od wielu lat w eksploatacji w celu diagnozowania okrętowych silników tłokowych wykorzystuje się pomiar ciśnienia w cylindrze. Ciśnienie spalin w cylindrze może być mierzone jako ciśnienie statyczne lub dynamiczne. Ciśnienie mierzone statycznie określa tylko szczelność komory spalania, tj. stan techniczny współpracujących ze sobą węzłów tribologicznych TPC (tłok-pierścienie-cylinder) oraz zawory dolotowe/wylotowe – gniazda zaworowe (dla silników dwusuwowych zawór wylotowy – gniazdo zaworowe). Ciśnienie cylindrowe dynamiczne, mierzone na pracującym silniku uwzględnia (oprócz szczelności komory spalania) przebieg procesów termodynamicznych w trakcie pracy danego cylindra. Ocena zmian ciśnienia cylindrowego (wykresu indykatorowego) i odczytywanych parametrów indykatorowych jest wykorzystywana m.in. w diagnostyce układu wtryskowego, układu wymiany ładunku i węzła tribologicznego TPC.

Urządzenie do pomiaru przebiegu ciśnienia cylindrowego nazywane jest indykatorem. Obecnie stosowane w eksploatacji indykatory to najczęściej indykatory elektroniczne. Najważniejszymi elementami takiego układu pomiarowo-kontrolnego są czujniki ciśnienia (przetworniki ciśnienia). Ich zadanie polega na zamianie dynamicznych zmian ciśnienia w punkcie pomiarowym na precyzyjne zmiany napięcia, natężenia lub rezystancji prądu, co stanowi sygnał wejściowy dla właściwej aparatury.

Podstawowe problemy konstrukcyjne i eksploatacyjne czujników ciśnienia do pomiaru gazów z cylindra wynikają z dużej dynamiki zmian ciśnienia, wpływu

wysokich temperatur gazów spalinowych czy drgań. Jednocześnie wymaga się, aby czujniki te cechowały się odpowiednią dokładnością pomiarów i zadowalającą niezawodnością. Przetwornik ciśnienia montuje się najczęściej na zaworze (kurku) indykatorowym, który stanowi wraz z kanałem wydrążonym w głowicy cylindrowej kanał łączący. Istotnymi elementami indykatora typu elektronicznego są również przetworniki analogowo-cyfrowe, przetworniki położenia wału korbowego i odpowiedni układ mikroprocesorowy (komputerowy). Dzięki temu urządzeniu można uzyskać przebieg ciśnienia w postaci graficznej (wykres indykatorowy otwarty lub zamknięty) i odczytać parametry indykowane silnika. Indykatory mogą być konstruowane w formie stacjonarnej lub przenośnej.

## **2. CZYNNIKI KONSTRUKCYJNE I EKSPLOATACYJNE WPŁYWAJĄCE NA JAKOŚĆ POMIARÓW CIŚNIENIA CYLINDROWEGO**

Na podstawie przebiegu ciśnienia cylindrowego najczęściej wyznacza się następujące parametry indykowane:

- średnie ciśnienie indykowane;
- maksymalne ciśnienie spalania;
- ciśnienie sprężania;
- moc indykowaną;

które wsparte parametrami pomocniczymi są zazwyczaj wystarczające do diagnostyki wybranych uszkodzeń oraz planowania przeglądów i remontów. Porównuje się również kształt i przebieg wykresu indykatorowego czyli przebieg ciśnienia panującego w cylindrze w funkcji czasu lub części w funkcji kąta obrotu wału korbowego. Przydatność wykresów indykatorowych może być zadowalająca, o ile w procedurze pomiarowej wyeliminowane zostaną błędy.

Do najczęstszych błędów eksploatacyjnych podczas indykowania okrętowego silnika tłokowego za pomocą indykatora elektronicznego należą:

- nieprawidłowo skalibrowany indykator;
- nieszczelności spowodowane nieprawidłowym połączeniem przetwornika ciśnienia z zaworem indykatorowym;
- brak lub dławienie przepływu spalin przez kanały łączące na skutek ich zakokosowania;
- naprężenia wewnętrzne przetwornika ciśnienia spowodowane różnicą temperatur podczas kolejnych pomiarów;
- zmiany obciążenia silnika podczas trwania pomiaru;
- różnica temperatury otoczenia i ciśnienia atmosferycznego pomiędzy okresowymi pomiarami.

Błędów eksploatacyjnych można uniknąć. Pomiarom mogą jednak towarzyszyć zakłócenia, wynikające z konstrukcji silnika i układu pomiaru ciśnienia

cyldrowego. Wiąże się to z kształtem, długością i objętością kanału łączącego komorę spalania z elementem pomiarowym. We współczesnych okrętowych silnikach tłokowych przetwornik ciśnienia spalania instaluje się na zaworach indykatrowych lub przed nimi. Konstrukcja zaworu indykatrowego powoduje wydłużenie kanału łączącego i dławienie przepływających gazów spalinowych.

Do najczęściej występujących zakłóceń podczas indykowania silnika, spowodowanych kanałami łączącymi, należą [Wajand 1974; Tomczak 2001; Gałecki i Tomczak 2002]:

- opóźnienie impulsu ciśnienia wskutek czasu potrzebnego do przemieszczenia się fali ciśnienia przez kanał;
- spadek ciśnienia działającego na węzeł pomiarowy przetwornika, spowodowany dławieniem przepływu przez kanał;
- drgania rezonansowe słupa gazów w kanale łączącym;
- zmiana temperatury węzła pomiarowego przetwornika ciśnienia;
- przyspieszenie prędkości gazów spalinowych.

Do opóźnienia impulsu ciśnienia dochodzi na skutek czasu potrzebnego do przemieszczenia się fali ciśnienia przez kanał. Opóźnienie to jest zależne od: prędkości chwilowej przemieszczającego się impulsu ciśnienia w kanale oraz od długości tego kanału.

Spadek ciśnienia działającego na przetwornik jest spowodowany dławieniem przepływu przez kanał. Prędkość impulsu jest różna dla prędkości gazu nadanej przez ruch tłoka i różna dla prędkości związanej z szybkim wzrostem ciśnienia, spowodowanego spalaniem.

Straty ciśnienia powstałe w kanale można podzielić na straty ciśnienia wzdłuż długości kanału, straty ciśnienia na wejściu do kanału i wyjściu z kanału. W przypadku, gdy gaz z cylindra wypływa z kanału do komory większej niż przekrój kanału, wzrasta ciśnienie w tej komorze, dlatego też należy uwzględnić przyrost tego ciśnienia. Jeżeli kanały są zamocowane na stałe na silniku, jak np. zawór indykatrowy, należy uwzględnić to, że po pewnym czasie eksploatacji oraz w trakcie wykonywania pomiarów na ściankach kanału mogą osadzać się produkty niezupełnego spalania.

Niedokładne wykonanie wykresów indykatrowych może być spowodowane drganiami rezonansowymi czujnika. Drgania słupa gazu zależne są przede wszystkim od średnicy kanału. Drgania są znacznie mniejsze, gdy stosuje się kanał o mniejszej średnicy niż drgania w przypadku stosowania kanału o średnicy większej. Zakłócenia pomiaru ciśnienia w cylindrze mogą być większe, gdy stosuje się kanały załamane. Powstają tam większe drgania impulsu gazu, co powoduje wzrost wartości ciśnienia.

Jak dowodzą badania innych autorów, dla tego typu zakłóceń znaczący wpływ ma rodzaj silnika okrętowego. Pomiar przebiegu ciśnienia w komorze spalania na silniku wolnoobrotowym będą obarczone mniejszym błędem niż dla silnika średnioobrotowego [Polanowski, Pawletko i Witkowski 2013].

### **3. BŁĘDY WYSTĘPUJĄCE PODCZAS POMIARÓW CIŚNIENIA CYLINDROWEGO, WYNIKAJĄCE Z KONSTRUKCJI KANAŁÓW POMIAROWYCH SILNIKA**

Wykresy indykatorowe, czyli przebieg ciśnienia w funkcji czasu lub kąta obrotu wału korbowego, są powszechnie stosowane w diagnostyce okrętowych silników spalinowych. Sporządzenie wykresu w funkcji czasu daje możliwość wiarygodnego odczytania jedynie maksymalnego ciśnienia spalania. Do bardziej szczegółowej analizy, np. określenia średniego ciśnienia indykowanego, konieczne jest przyporządkowanie na wykresie skali kątowej obrotu wału korbowego silnika oraz dokładne odwzorowanie na wykresie górnego martwego położenia tłoka w cylindrze (GMP).

Współcześnie do określenia GMP wykorzystuje się dwie metody. Obie obciążone są znaczącymi błędami.

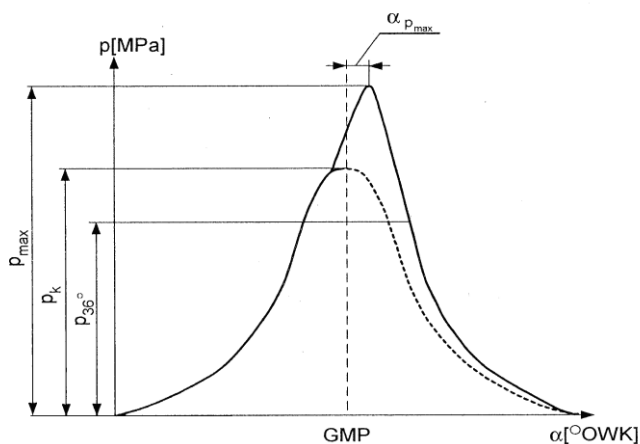
Jedną z metod określenia położenia GMP na wykresie indykatorowym są znaczniki, zamocowane na wolnym końcu wału korbowego lub na kole zamachowym silnika. Jest to metoda droga, wymaga dodatkowej aparatury, nie zawsze konstrukcyjnie łatwa do zrealizowania na istniejącym silniku. Obciążona jest zakłóceniami, pochodzącymi od skręcania wału korbowego, oraz opóźnieniem wnoszonym przez objętość kanałów, łączących cylinder z przetwornikiem.

Druga metoda jest metodą pośrednią, matematyczną. Polega na aproksymacji krzywej ciśnienia spalania do krzywej sprężania i wyznaczeniu maksimum sprężania jako GMP. Ta metoda również obciążona jest zakłóceniami, wynikającymi z opóźnień ciśnienia gazu, przepływającego przez kanały gazów spalinowych. Można uniknąć tych błędów, montując przetwornik ciśnienia cylindrowego bezpośrednio w komorze spalania [Polanowski 2007].

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy rozwinięty wykres indykatorowy, na którym zaznaczono górne martwe położenie tłoka.

Jedna z krzywych, przechodząca w krzywą przerywaną, to krzywa przebiegu ciśnienia sprężania.

Krzywa ciągła to krzywa ciśnienia cyklu sprężania i spalania.



**Rys. 1.** Przykładowy wykres indykatorowy;  $p_{max}$  – maksymalne ciśnienie spalania,  $p_k$  – ciśnienie kompresji,  $p_{36}$  – ciśnienie ekspansji,  $\alpha_{p_{max}}$  – kąt OWK występowania maksymalnego ciśnienia spalania

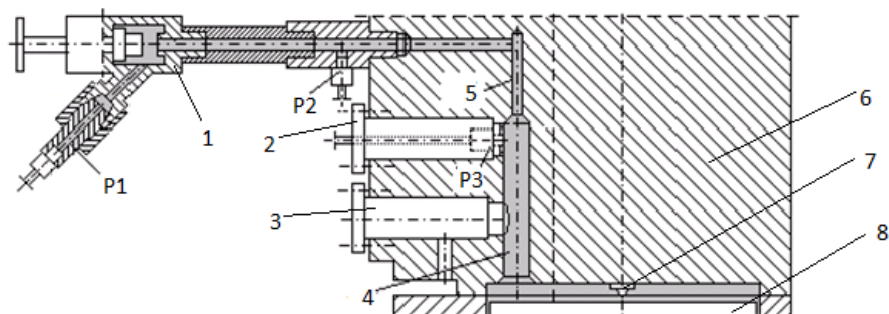
**Fig. 1.** Exemplary indicator diagram;  $p_{max}$  – maximum combustion pressure,  $p_k$  – compression pressure,  $p_{36}$  – expansion pressure,  $\alpha_{p_{max}}$  – the angle of rotation of the crankshaft of the maximum combustion pressure

Źródło: [Piotrowski i Witkowski 2003].

W wielu ośrodkach badawczo-naukowych prowadzono badania nad wpływem kanałów łączących na sporządzane wykresy indykatorowe. Wykazano, że położenie czujnika ciśnienia oraz kształt i długość kanałów pomiarowych ma wpływ na jakość wykonanych wykresów indykatorowych.

W Laboratorium Silników Okrętowych Katedry Siłowni Okrętowej AM w Gdyni przeprowadzono badania na temat wpływu lokalizacji czujnika ciśnienia na jakość parametrów termodynamicznych, wyliczonych na podstawie wykresu indykatorowego silnika okrętowego Sulzer AL25/30. Do pomiarów wykorzystano trzy czujniki ciśnienia marki Kistler typ 6353A24 i zamontowano je: na zaworze indykatorowym, w adapterze przed zaworem indykatorowym i w miejscu nieczynnego zaworu rozruchowego (rys. 2) [Polanowski, Pawletko i Witkowski 2013]. Badany silnik był obciążony prądnicą i pracował ze stałą prędkością 750 obr/min. Silnik był obciążany w trzech zakresach: bieg jałowy, 40 i 70% obciążenia znamionowego. Pozytcje GMP wyznaczono na podstawie punktu zerowego pochodnych pierwszego rzędu.

Na rysunku 2 widać bardzo dużą złożoność kanałów łączących (załamania, zmiana objętości, długość kanału). Wykonano również pomiar przebiegu ciśnienia sprężania poprzez podwieszenie pompy wtryskowej.

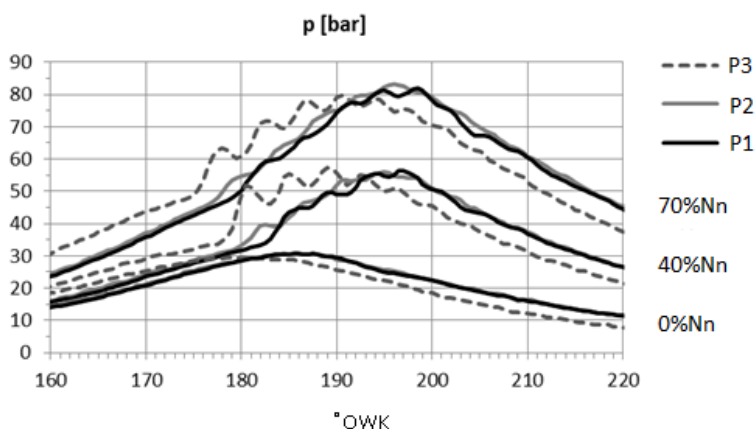


**Rys. 2.** Sposób umiejscowienia czujników ciśnienia na silniku Sulzer AL25/30;  
 P1 – czujnik ciśnienia zamontowany na zaworze indykatorowym, P2 – czujnik ciśnienia zamontowany w specjalnym adapterze przed zaworem indykatorowym,  
 P3 – czujnik ciśnienia zamontowany w zaworze startowym, 1 – zawór indykatorowy, 2 – zawór startowy, 3 – zawór bezpieczeństwa głowicy, 4 – kanał łączący cylindra, 5 – kanał pomiarowo-odprężny, 6 – głowica cylindra, 7 – rozpylacz zaworu wtryskowego, 8 – komora spalania

**Fig. 2.** Location of pressure sensors on the Sulzer AL25/30 engine; P1 – pressure sensor mounted on the indicator valve, P2 – pressure sensor mounted in a special adapter in front of the indicator valve, P3 – pressure sensor mounted in the start valve, 1 – indicator valve, 2 – start valve, 3 – head safety valve, 4 – cylinder connecting channel, 5 – measurement channel, 6 – cylinder head, 7 – injection valve, 8 – combustion chamber  
 Źródło: [Polanowski, Pawletko i Witkowski 2013].

Wyniki sprężania w formie graficznej przedstawiono na rysunku 3 [Polanowski, Pawletko i Witkowski 2013].

Porównując wykresy przebiegu ciśnień sprężania (rys. 3) można zauważyć, że wykresy sporządzone na podstawie pomiarów ciśnienia czujnikami, zainstalowanymi przed i za zaworem indykatorowym, poprzesuwały się w prawo w stosunku do odczytu ciśnienia w kanale zaworu startowego. Oznacza to, że strumień ciśnienia gazów dotarł do czoła czujników P2 i P1 z opóźnieniem. Autorzy badań wykazali, że położenie czujnika ciśnienia miało również wpływ na położenie GMP. Pozycje GMP wyznaczono na podstawie punktu zerowego pochodnych pierwszego rzędu i wynosiły odpowiednio: 108,4 °OWK dla pomiaru w cylindrze P3, 179,3 °OWK dla pomiaru przed zaworem indykatorowym P2 i 179,8 °OWK dla pomiaru za zaworem indykatorowym P1 [Polanowski, Pawletko i Witkowski 2013]. Są to istotne różnice, które mają duży wpływ na prawidłowe obliczenie średniego ciśnienia indykowanego. Przyjmuje się, że błąd w wyznaczeniu GMP wynoszący 1°OWK powoduje błąd wyznaczenia parametrów indykowanych rzędu 3 do 8% [Wajand 1974; Tomczak 2001].

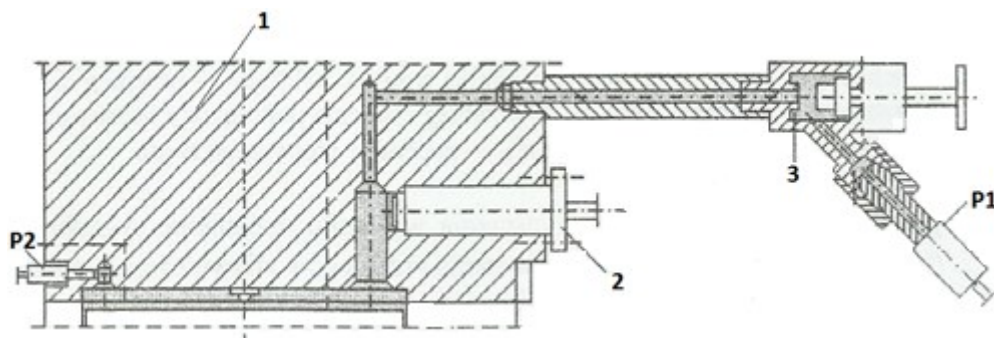


Rys. 3. Wykres indykatorowy ciśnienia sprężania

Fig. 3. Indicator diagram of the compression pressure

Źródło: [Polanowski, Pawletko i Witkowski 2013].

Podobne badania przeprowadzono w Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni pod kierownictwem profesora Stanisława Polanowskiego. Tym razem czujnik ciśnienia zamontowano na zaworze indykatorowym i w głowicy cylindrowej (rys. 4) [Polanowski 2007]. Długość kanału łączącego cylinder z elementem pomiarowym wynosiła 10 cm, był on załamany pod kątem prostym.



Rys. 4. Sposób montażu czujników ciśnienia na silniku Sulzer AL 20/24;

P1 – czujnik ciśnienia zamontowany na zaworze indykatorowym, P2 – czujnik ciśnienia zamontowany w głowicy, 1 – głowica cylindra, 2 – zawór startowy, 3 – zawór indykatorowy

Fig. 4. Way of mounting pressure sensors on the Sulzer AL 20/24 engine;

P1 – pressure sensor mounted on the indicator valve, P2 – pressure sensor mounted in the head, 1 – cylinder head, 2 – start valve, 3 – indicator valve

Źródło: [Polanowski 2007].



Obiektem badawczym był silnik okrętowy Sulzer AL20/24 obciążony momentem obrotowym w postaci hamulca wodnego. Przebiegi ciśnień zarejestrowano jednocześnie przy prędkości obrotowej silnika 750 obr/min. Badania wykazały znaczącą deformację przebiegu ciśnień przez kanał gazowy i zawór indykatorowy. Wystąpiło również opóźnienie sygnału pomiarowego, które wynosiło 2,7 °OWK. Opóźnienie sygnału spowodowane było różnicą długości kanałów pomiarowych (rys. 4) [Polanowski 2007].

Innym przykładem badań nad wpływem kanałów pomiarowych na pomiar przebiegu ciśnień cylindrowych są badania wykonane w Politechnice Częstochowskiej pod kierownictwem profesora Karola Cupiała. Obiektem badań był silnik specjalnie zbudowany na bazie silnika Sulzer AL 20/24. Silnik był zasilany paliwem gazowym. Czujniki ciśnienia w tym przypadku zamontowano w miejscu zaworu rozruchowego i w miejscu zaworu indykatorowego. Zaobserwowano zbliżone wartości średniego ciśnienia indykowanego i mocy indykowanej. Wynika to z przybliżonych wielkości kanałów pomiarowych, ponieważ zawór indykatorowy został pominięty [Cupiał i in. 2001].

Badania nad wpływem wielkości kanałów pomiarowych na wyniki indykowania okrętowego silnika tłokowego dwusuwowego były prowadzone w Katedrze Siłowni Okrętowych Wydziału Mechanicznego Akademii Morskiej w Gdyni pod kierownictwem dr. inż. Leonarda Tomczaka. Badanym obiektem był jednocylindrowy, dwusuwowy silnik laboratoryjny L22 o mocy nominalnej 73,5 kW, obciążony hamulcem wodnym Junkers H4m. Do pomiaru ciśnienia i rejestracji danych pomiarowych wykorzystano indykator Unitest 2000. Pomiar przeprowadzono przy dwóch prędkościach obrotowych silnika 220 obr/min i 320 obr/min oraz przy zmiennym obciążeniu. W pierwszej kolejności dokonano pomiaru wzorcowego, tj. czujnik ciśnienia zamontowano na zaworze indykatorowym. Następnie wprowadzono kolejno trzy zakłócenia w postaci dodatkowego kanału pomiarowego pomiędzy przestrzenią wewnątrz cylindrową a zaworem indykatorowym. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów ustalono, że:

- średnie ciśnienie indykowane zwiększa się wraz ze wzrostem objętości kanałów łączących;
- im dłuższy kanał łączący, tym większe jest przesunięcie wykresu w prawo;
- długość kanału powoduje zakłócenia w odwzorowaniu GMP;
- GMP przesuwa się w prawo wraz ze wzrostem długości kanału łączącego;
- wraz ze wzrostem wielkości kanałów łączących maksymalne ciśnienie spalania zmalało;
- wraz ze wzrostem prędkości obrotowej silnika zwiększały się odchyłki wartości parametrów indykowanych.

Powyższe zakłócenia wywołane były przez zjawiska falowe, występujące w kanałach łączących czujnik ciśnienia z przestrzenią pomiarową. Przewody łączące

powodowały dławienie i odbicia falowe, zniekształcając sygnał pomiarowy [Tomczak 2001; Gałęcki i Tomczak 2002].

#### **4. BUDOWA STANOWISKA POMIAROWEGO DO INDYKOWANIA OKRĘTOWEGO SILNIKA TŁOKOWEGO**

Pomiary przebiegów ciśnień w cylindrach okrętowych silników tłokowych dokonywane są za pomocą przetworników ciśnienia montowanych na zaworach lub przed zaworami indykatorowymi. Jak wykazano powyżej, pomiary te obarczone są znacznymi błędami opóźnień fazowych i zakłóceń falowych. Nie uzyskano także pozytywnych wyników w przypadku zamocowania czujnika ciśnienia w komorze nieczynnego zaworu rozruchowego. Ewentualne umieszczenie czujnika w głowicy stwarza znaczne trudności natury technicznej. Uwzględniając dotychczasowe doświadczenia, zdecydowano się na montaż czujnika w kołnierzu tulei cylindrowej, licząc się z możliwością występowania fali stojącej w kanale, łączącym czoło czujnika z przestrzenią wewnątrz cylindrową.

Stanowiskiem badawczym jest niezależny zespół prądotwórczy. W skład zespołu wchodzi trzycylindrowy, średnioobrotowy silnik SULZER 3AL25/30 z wtryskiem bezpośrednim, obciążony prądnicą GD8-500-50. Wytworzoną energię elektryczną prądnica oddaje do opornika nożowego. Silnik jest doładowany i wyposażony w turbosprężarkę typu VTR 160 Brown-Boveri z chłodnicą powietrza. Jest także przystosowany do symulowania uszkodzeń w układzie doładowania, wtrysku paliwa, wymiany ładunku i układzie tłokowo-cylindrowym.

Urządzeniem pomiarowo-rejestrującym przebiegi ciśnień jest indykator elektroniczny, stacjonarny Unitest 2008. W skład systemu pomiarowego wchodzi rejestrator wraz z zasilaczem, trzy czujniki ciśnienia spalania, trzy czujniki ciśnienia wtrysku i dekodery położenia kąтового z czujnikiem zintegrowanym o rozdzielczości 720 impulsów na obrót wału korbowego. Rejestrator komunikuje się z komputerem PC za pomocą złącza USB 2.0. Indykator rejestruje ciśnienie spalania co 0,5 °OWK, z 16 pełnych cykli pracy silnika, tj. 32 obrotów wału korbowego, co daje 1440 pomiarów ciśnienia na jeden cykl pracy silnika (720 °OWK). Do odczytu ciśnienia służą piezoelektryczne czujniki ciśnienia firmy KISTLER typu 6353 A24, zainstalowane w adapterze KISTLER 7524B przed zaworem indykatorowym na każdym z trzech cylindrów silnika laboratoryjnego.

W przetwornikach wykorzystywane jest zjawisko piezoelektryczne kryształu kwarcu. Ładunek elektryczny odbierany jest za pomocą elektrody. Ważną zaletą tego przetwornika jest posiadanie w całym swoim zakresie pracy charakterystyki liniowej. Ilość wytworzonego ładunku jest proporcjonalna do odkształceń sprężystych kryształu. Od strony czynnika roboczego przetwornik jest szczelnie oddzielony membraną, która przekazuje naprężenia, wywołane siłą ciśnienia bezpośrednio na kryształek kwarcu. Membrana wraz z całą oprawą charakteryzuje się, w porównaniu

z kryształem, dużo mniejszą sztywnością, aby jak największa część strumienia ciśnienia oddziaływała na kwarc. System diagnostyczny Unitest 2008 dodatkowo jest wyposażony w czujniki do pomiaru ciśnienia wtrysku paliwa. Sensory zamocowane są w specjalnych adapterach na przewodach wysokiego ciśnienia układu paliwowego [Instrukcja obsługi programu Unitest 2008; KISTLER].

W celu wyeliminowania omówionych wcześniej w artykule zakłóceń czujnik ciśnienia powinien być zamontowany bez pośredniczących kanałów gazowych w taki sposób, aby oś symetrii membrany pomiarowej czujnika była prostopadła do ścianki komory spalania silnika [Polanowski 2007].

Zaproponowanym przez autora rozwiązaniem jest montaż czujnika w kołnierzu tulei cylindrowej (rys. 5). Otwór pomiarowo-montażowy czujnika w tulei cylindrowej wykonano według własnego projektu zgodnie z zaleceniami producenta czujnika. Wykonany otwór pomiarowo-montażowy znajduje się po tej samej stronie co zawór dolotowy powietrza w głowicy cylindrowej.

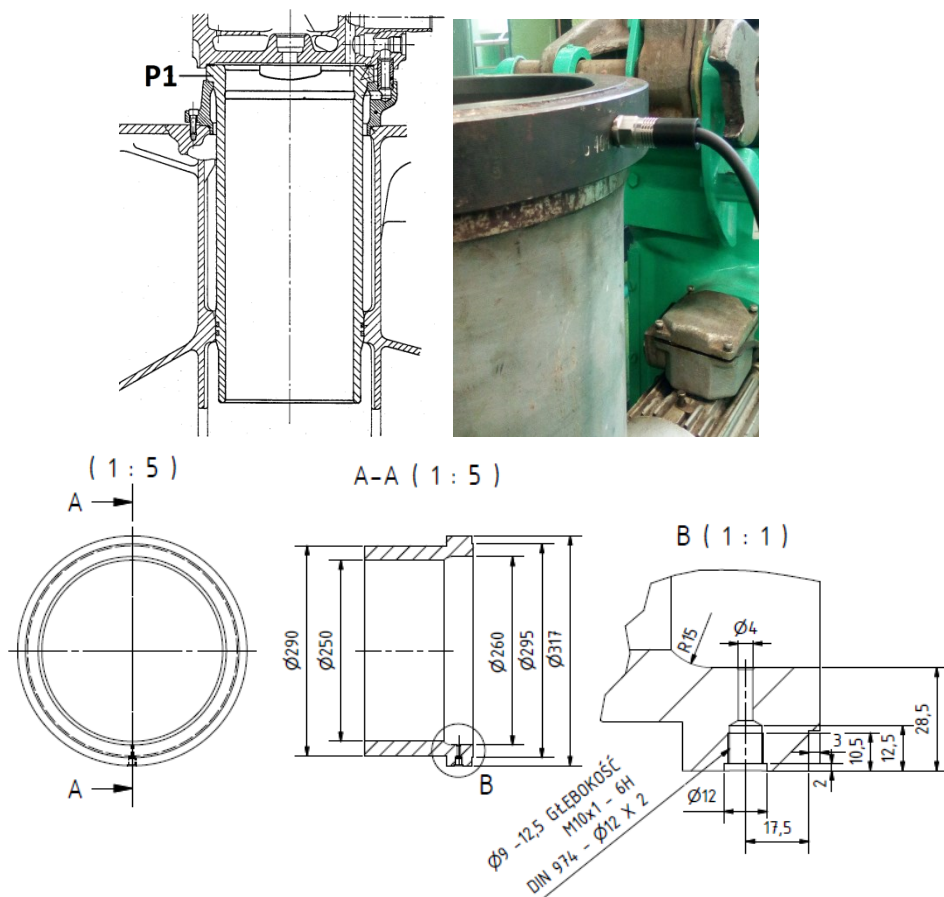
Na wybór miejsca montażu czujnika miała wpływ temperatura panująca w komorze spalania. Założono, że montaż czujnika ciśnienia po stronie zaworu dolotowego będzie korzystniejszy ze względu na oddziaływanie wysokiej temperatury gazów spalinowych. Zalecana temperatura powietrza doładowania, mierzona za chłodnicą powietrza, powinna wynosić 45°C. W przypadku montażu przetwornika po przeciwnej stronie tulei cylindrowej, w pobliżu zaworu wydechowego czujnik ciśnienia byłby narażony na wysoką temperaturę nawet do 500–600°C oraz korozyjne oddziaływanie spalin.

Najbardziej obciążony termicznie okres pracy badanego silnika trwa od początku samozapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej do czasu otwarcia zaworu wydechowego czyli przez 123,5 °OWK od GMP w suwie pracy. Okres najwyższych obciążeń cieplnych wynosi więc około 17% stopni obrotów wału korbowego cyklu roboczego. Po otwarciu zaworu wydechowego dochodzi do wypływu gazów wydechowych ze znaczną prędkością, rozprężenia i nagłego przechłodzenia komory spalania. Intensywnie chłodzone są również wszystkie ścianki komory spalania za pomocą wody chłodzącej i oleju obiegowego. Temperatura wody chłodzącej po stronie dolotu do silnika nie powinna przekraczać 75°C. Woda odbiera ciepło z głowicy cylindrowej i zewnętrznych ścianek cylindra. Olej smarny odbiera ciepło z wewnętrznych ścianek cylindra, ze ścianek tłoka i denka tłoka dzięki wewnętrznej węzownicy. Temperatura oleju obiegowego nie przekracza 65°C.

Wskazany wybór miejsca montażu przetwornika ciśnienia oraz możliwe zagrożenie jego uszkodzeniem na skutek wysokich temperatur spowodowały, że przeprowadzono badania temperatury w wykonanym w kołnierzu tulei kanale pomiarowym. Zamontowano tam wysokiej jakości termoparę, następnie stopniowo obciążano silnik aż do uzyskania obciążenia nominalnego.

Przeprowadzone badania nie wykazały przeciwwskazań do zamontowania czujnika ciśnienia KISTLER 6353A24. Zmierzone temperatury w miejscu montażu

czujnika ciśnienia i przy największych obciążeniach silnika nie przekroczyły 350°C. Wartość ta jest wartością graniczną, podaną przez producenta czujnika ciśnienia.



**Rys. 5.** Miejsce zamocowania czujnika ciśnienia w tulei cylindrowej;  
P1 – miejsce instalacji czujnika ciśnienia

**Fig. 5.** Location of the pressure sensor in the cylinder liner;  
P1 – place of installation of the pressure sensor

Źródło: opracowanie własne.

Długość kanału pomiarowego, łączącego przestrzeń wewnątrz cylindrową i membranę czujnika, wynosi 16 mm, a średnica 4 mm. Zarejestrowane dotąd wykresy indykatorowe nie wykazują znaczących zakłóceń, ale konieczne są dalsze badania.

## 5. WNIOSKI

Omówione w artykule błędy pomiarowe mierzonego ciśnienia cylindrowego, wynikające z dodatkowych przestrzeni szkodliwych w postaci kanałów pomiarowych, mają charakter powtarzalny i wpływają m.in. na dokładność obliczonych podstawowych parametrów indykowanych. Powyższe ma znaczenie zarówno w procesie diagnostycznym, jak i w regulacji silnika. To zaś może mieć konsekwencje ekonomiczne, a także ekologiczne.

Przeprowadzone dotychczas badania wstępne pomiaru ciśnienia cylindrowego z czujnikiem umiejscowionym w kołnierzu tulei cylindrowej, nie wykazały przeciwwskazań do dalszej i dokładniejszej analizy wykresów indykatorowych, sporządzonych metodą proponowaną przez autora. Zmierzona w miejscu zamontowania czujnika ciśnienia temperatura nie przekroczyła wartości krytycznych, podanych przez producenta przetwornika. Kanały pomiarowe tak małych wymiarów nie powodują tak dużych zakłóceń jak w przypadku pomiarów z czujnikiem zamontowanym na zaworze indykatorowym. Konieczna jest dalsza pogłębiona analiza wykresów indykatorowych, sporządzonych z wykorzystaniem czujnika ciśnienia zamontowanego w kołnierzu cylindra. Wyniki tych badań zostaną zaprezentowane w kolejnych artykułach.

## LITERATURA

- Cupał, K., Dużyński, A., Gruca, M., Grzelka, J., 2001, *Some Errors of Gas Engine Indication*, Journal of Kones, vol. 8, no. 1–2.
- Gałecki, W., Tomczak, L., 2002, *Indykowanie okrętowych silników spalinowych*, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia.
- H. Cegielski, Zakład Przemysłu Metalowego, *Instrukcja techniczno-ruchowa silnika okrętowego Sulzer – H. Cegielski typ 3A125*, Poznań.
- Instrukcja obsługi programu Unitest, 2008, Gdynia.
- KISTLER, materiały informacyjno-reklamowe firmy, <https://www.kistler.com/en/>.
- Piotrowski, I., Witkowski, K., 2003, *Okrętowe silniki spalinowe*, Trademar, wydanie 3a, Gdynia.
- Polanowski, S., 2007, *Studium metod analizy wykresów indykatorowych w aspekcie diagnostyki silników okrętowych*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni, nr 169A.
- Polanowski, S., Pawletko, R., Witkowski, K., 2013, *Influence of Pressure Sensor Location on the Quality of Thermodynamic Parameters Calculated from the Marine Engine Indicator Diagram*, Combustion Engines, vol. 154, no. 3, s. 319–323.
- Tomczak, L., 2001, *Wykorzystanie pośredniej metody określania położenia wału korbowego w indykatorze elektronicznym*, praca doktorska, Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny.
- UNITEST, materiały informacyjno-reklamowe firmy, <http://www.unitest.pl/>.
- Wajand, J., 1974, *Pomiary szybkozmiennych ciśnień w maszynach tłokowych*, WNT, Warszawa.