

BADANIA PORÓWNAWCZE WYKRESÓW INDYKATOROWYCH I PARAMETRÓW INDYKOWANYCH OKRĘTOWYCH SILNIKÓW TŁOKOWYCH DLA RÓŻNYCH PUNKTÓW POMIARU CIŚNIENIA CYLINDROWEGO

Jacek Wysocki

Uniwersytet Morski Gdynia

Wydział Mechaniczny, Katedra Słowni Okrętowych

e-mail: j.wysocki@wm.umg.edu.pl

Streszczenie

W artykule omówiono jedną z najbardziej popularnych w eksploatacji metod diagnozowania wybranych uszkodzeń okrętowych silników tłokowych, którą jest indykowanie czyli pomiar zmian ciśnienia w komorze spalania silnika. Poprawa jakości wykresów indykatorowych może przyczynić się do zwiększenia efektywności wykorzystania parametrów indykowanych w diagnostyce okrętowych silników tłokowych. Błędy pomiarowe podczas indykowania silnika spowodowane są przede wszystkim kanałami pomiarowymi, które łączą komorę spalania z czujnikiem ciśnienia. Do błędów spowodowanych przez kanały pomiarowe podczas indykowania silnika należą między innymi: opóźnienie impulsu ciśnienia, przyspieszenie impulsu ciśnienia, drgania rezonansowe, dławienie przepływu gazu i inne. Jednym ze sposobów uniknięcia powstawania tych błędów jest zamontowanie czujnika ciśnienia bezpośrednio w komorze spalania. Wydaje się, że możliwe jest wówczas wyeliminowanie tych błędów. Istnieje jednak ryzyko, że czujnik ciśnienia zostanie uszkodzony poprzez oddziaływanie na niego wysokiej temperatury podczas spalania mieszaniny paliwowo-powietrznej w komorze spalania silnika. W artykule przedstawiono wyniki badań, które wskazują, że pomierzone temperatury w miejscu montażu czujnika (w komorze spalania) nie przekroczyły wartości krytycznej podanej przez producenta czujnika ciśnienia. W artykule przedstawiono także wyniki pomiaru ciśnień cylindrowych nie tylko w komorze spalania ale i w dwóch innych punktach - na gwincie kurka indykatorowego i w kanale pomiarowym pomiędzy kurkiem indykatorowym a głowicą cylindra. Badania przeprowadzono w szerokim zakresie obciążenia silnika technicznie sprawnego i z symulowanymi uszkodzeniami w układzie wtrysku paliwa. W artykule dokonano analizy porównawczej odczytywanych z wykresu indykatorowego parametrów dla trzech wyżej wymienionych miejsc pomiaru ciśnień. Wykazano, że pomiary ciśnień realizowane bezpośrednio w komorze spalania są pozbawione błędów wynikających z wpływu kanałów pomiarowych i kurków indykatorowych.

Słowa kluczowe: diagnostyka, silniki okrętowe tłokowe, silniki o zapłonie samoczynnym, indykowanie, ciśnienie spalania, ciśnienie spalania

1. Wstęp

Najczęściej stosowane źródła energii w międzynarodowym transporcie morskim (elektrownie okrętowe i układy napędowe statku) to tłokowe silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym [6, 12]. Okrętowe silniki tłokowe generują duże koszty zastosowania i eksploatacji. Wynika to z: dużego kosztu budowy, coraz większego obciążania silników, ich intensywnej eksploatacji i trudnych warunków, w których silniki okrętowe są eksploatowane (środowisko morskie, paliwa złej jakości). Wymaganiami nadrzędnymi stawianymi układom napędowym statku i elektrowniom okrętowym jest bezpieczeństwo żeglugi i eksploatacji. W ostatnich latach zwiększone są również wymagania dotyczące ochrony środowiska, w tym przede wszystkim zmniejszenie emisji

szkodliwych gazów do atmosfery ze statków o czym mówi Aneks VI Konwencji MARPOL. Dąży się również do wzrostu efektywności energetycznej statku, co wiąże się z ograniczeniem emisji gazów cieplarnianych. Wszystkie wymienione uwarunkowania i wymagania wymuszają stosowanie systemów zabezpieczeń, monitorowania i systemów diagnostyki okrętowych silników tłokowych. W celu monitorowania i diagnozowania silników tłokowych w eksploatacji wykorzystuje się najczęściej następujące metody [2, 6]:

- oględziny i pomiary poszczególnych elementów i systemów silnika,
- pomiary parametrów pomocniczych (temperatury i ciśnienia płynów eksploatacyjnych),
- pomiary parametrów głównych (moc, moment obrotowy, zużycie paliwa),
- pomiary parametrów indykowanych (średnie ciśnienie indykowane, moc indykowana, maksymalne ciśnienie spalania).

Ekologiczna, ekonomiczna, niezawodna i efektywna energetycznie praca silnika z zapłonem samoczynnym jest możliwa tylko wtedy, gdy układy funkcjonalne odpowiadające za wymianę czynnika termodynamicznego są utrzymane w optymalnym stanie technicznym. Do tych układów należą: układ doładowania i wymiany ładunku, układ wtrysku paliwa, układ tłok - pierścienie - cylinder (układ TPC). Podczas diagnozowania silników okrętowych w warunkach eksploatacyjnych dopóki nie są wymagane oględziny, korzysta się z analizy parametrycznej, w tym głównie wykorzystując parametry indykowane [6, 12]. W ostatnich latach do oceny stanu technicznego wyżej wymienionych układów wykorzystuje się w eksploatacji silników indykatory elektroniczne. Wykresy indykatorowe, sporządzone za pomocą indykatorów elektronicznych są podstawowym źródłem informacji diagnostycznej o stanie technicznym układów TPC, wtrysku i wymiany ładunku. Oprogramowanie indykatorów elektronicznych umożliwia odczyt parametrów indykowanych. W niektórych indykatorach elektronicznych oferowana jest możliwość pomiaru ciśnienia wtrysku paliwa lecz ze względów bezpieczeństwa pożarowego na statkach nie stosuje się powszechnie pomiaru ciśnienia wtrysku paliwa. Poprawę stanu diagnostyki silników okrętowych można uzyskać przez zwiększenie jakości (dokładności) pozyskiwania wykresów indykatorowych i pogłębioną ich analizę [11, 12].

Przydatność wykresów indykatorowych może być zadawalająca, o ile w procedurze pomiarowej wyeliminowane zostaną zakłócenia spowodowane kanałami łączącymi (pomiarowymi). [1, 2, 7, 8, 11, 13]: Do najczęstszych zakłóceń generowanych przez kanały pomiarowe należą

- opóźnienie impulsu ciśnienia w skutek czasu potrzebnego do przemieszczenia się fali ciśnienia przez kanał,
- drgania rezonansowe słupa gazów w kanale łączącym,
- spadek ciśnienia działającego na węzeł pomiarowy przetwornika, spowodowany dławieniem przepływu przez kanał,
- przyspieszenie prędkości gazu, spowodowane zmianą przekroju kanału pomiarowego.

Można uniknąć zakłóceń spowodowanych kanałami pomiarowymi montując przetwornik ciśnienia cylindrowego bezpośrednio w komorze spalania [7].

2. Budowa modelu badawczego

Stanowiskiem badawczym jest model rzeczywisty (rys. 1). Stanowi go zespół prądotwórczy składający się z okrętowego silnika tłokowego SULZER 3AL35/30 [3] oraz prądnicy prądu przemiennego, która gwarantuje obciążanie silnika w pełnym zakresie jego mocy. Jest to doładowany, okrętowy silnik tłokowy z wtryskiem bezpośrednim, o zapłonie samoczynnym

zamontowany w laboratorium Katedry Siłowni Okrętowych Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Silnik wyposażony jest w stacjonarny system diagnostyczny Unitest 2008, który umożliwia pomiar, rejestrowanie i przetwarzanie parametrów indykowanych w tym średniego ciśnienia indykowanego (dodatkowo system diagnostyczny umożliwia odczyt ciśnienia wtrysku paliwa) [4, 10]. System diagnostyczny jest wyposażony w wysokiej klasy czujniki ciśnienia renomowanej firmy KISTLER 5363 A24, które dedykowane są pomiarom szybkozmiennych ciśnień cylindrowych czterosuwowych okrętowych silników tłokowych [5].



Rysunek 1. Zdjęcie silnika tłokowego SULZER 3AL25/30.

Do wyznaczania charakterystyk obciążeniowych silnika w celach dydaktycznych i prowadzonych do tej pory badań naukowych, czujniki ciśnienia zamontowane były pomiędzy zaworem indykatorowym (w specjalnych adapterach firmy KISTLER), a kanałem łączącym w głowicach trzech cylindrów, co przedstawia rysunek 2 (p1-miejsce zamontowania czujnika ciśnienia pomiędzy zaworem indykatorowym a kanałem łączącym w głowicy). W celu wyeliminowania zakłóceń pomiarowych spowodowanych kanałami pomiarowymi zdecydowano się na montaż czujnika ciśnienia w kołnierzu tulei cylindrowej (rys. 2, 3), (p3 - miejsce montażu czujnika ciśnienia w kołnierzu cylindra). Wybór miejsca zamocowania czujnika ciśnienia nie był przypadkowy. Autorowi zależało na zamontowaniu czujnika w takim miejscu tulei cylindrowej, aby był on możliwie najmniej obciążony wysoką temperaturą wywołaną przez spalanie mieszanki paliwowo-powietrznej. Dlatego też wybrane miejsce osadzenia czujnika ciśnienia to kołnierz tulei cylindrowej, a w zasadzie jego fragment, po stronie położenia zaworu dolotowego powietrza doładowującego.

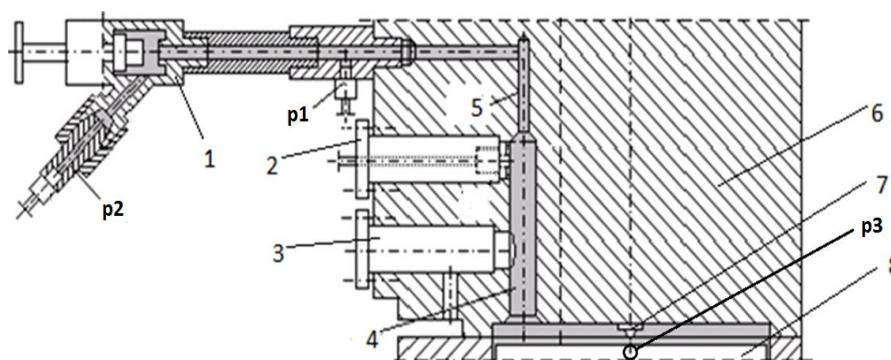
3. Plan i cel badań

Głównym zadaniem przeprowadzonych badań było poszukiwanie możliwości poprawienia jakości (dokładności) wykresów indykatorowych poprzez porównanie pomiarów ciśnienia cylindrowego, realizowanych w trzech różnych miejscach pomiarowych. Jeden z tych pomiarów realizowany jest bezpośrednio w komorze spalania, a więc z pominięciem wpływu kanału pomiarowego i kurka indykatorowego. Powyższe powinno przyczynić się do poprawy przydatności diagnostycznej parametrów indykowanych. Przeprowadzone dotąd badania zostały

podzielone na badania wstępne i badania właściwe. Głównym celem badań wstępnych było przygotowanie stanowiska badawczego oraz określenie najwyższej wartości średniej temperatury w miejscu montażu czujnika ciśnienia p3 (rys.2, 3).

Badania wstępne obejmowały:

- modernizację stanowiska pomiarowego - wykonano otwór montażowy czujnika ciśnienia w kołnierzu tulei cylindrowej zgodnie z zaleceniami producenta czujnika (rys.2, 3) [13],
- przygotowanie stanowiska do badań – wyregulowano statycznie silnik [3],
- montaż termopary w otworze pomiarowym w kołnierzu tulei cylindrowej,
- pomiar maksymalnej średniej temperatury w otworze pomiarowym bez symulacji uszkodzeń przy zmiennym obciążeniu silnika,
- symulowanie wybranych uszkodzeń i ponowny pomiar maksymalnej średniej temperatury w otworze pomiarowym przy zmiennym obciążeniu silnika.

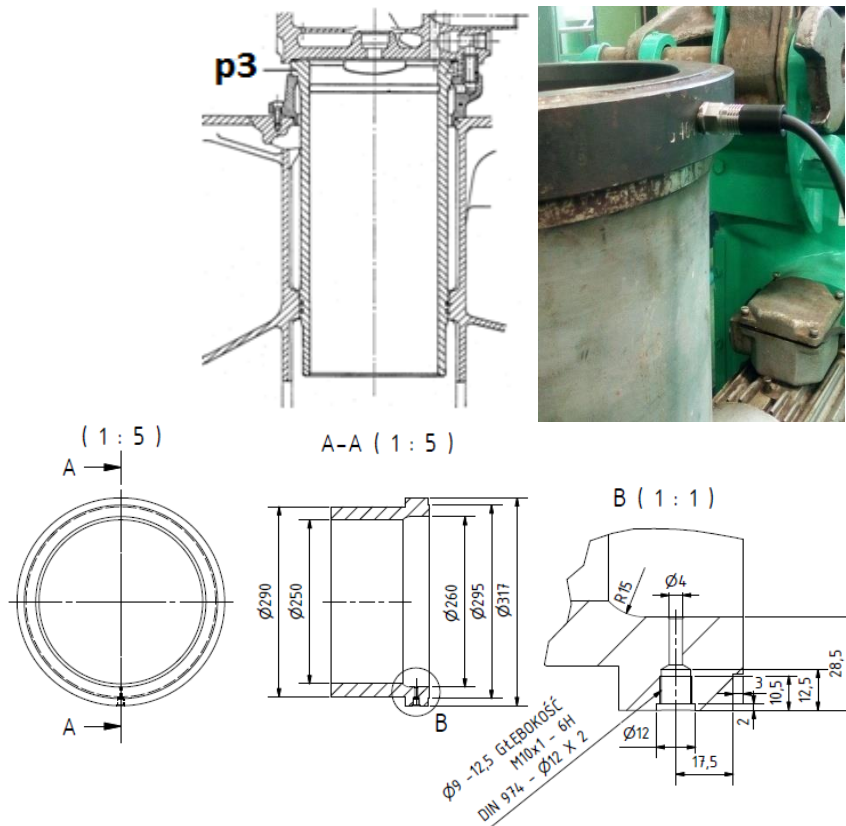


Rysunek 2. Rozmieszczenie czujników ciśnienia cylindrowego: p1- czujnik zamocowany w specjalnym adapterze pomiędzy zaworem indykatorowym a kanałem łączącym, p2 - czujnik ciśnienia zamontowany za zaworem indykatorowym, p3 - czujnik ciśnienia zamocowany w przygotowanym otworze montażowym kołnierza tulei cylindrowej, 1 - zawór indykatorowy, 2 - zawór startowy, 3 - zawór bezpieczeństwa, 4, 5 - kanał łączący (pomiarowy) w głowicy, 6 - głowica cylindra, 7 - wtryskiwacz, 8 - komora spalania.

Na podstawie wyników uzyskanych w badaniach wstępnych można stwierdzić, że najwyższa temperatura zmierzona podczas badań w kanale pomiarowym w kołnierzu tulei cylindrowej nie przekroczyła wartości dopuszczalnej podanej przez producenta czujnika ciśnienia. Najwyższa temperatura, którą uzyskano wyniosła 295°C [13], dopuszczalna zaś temperatura podana przez producenta czujników ciśnienia wynosi 350°C [5]. Z powyższego wynika, że jest możliwe wykorzystanie obecnie stosowanych czujników ciśnienia do pomiaru ciśnienia spalania bezpośrednio w komorze spalania. Szczegółowe wyniki badań były prezentowane na konferencji "SymSo" 2018 oraz na seminarium naukowym Wydziału Mechanicznego UMG.

Badania właściwe polegały na jednoczesnym pomiarze ciśnienia cylindrowego w trzech różnych punktach pierwszego cylindra silnika. Położenie czujników ciśnienia ilustruje rysunek 2 (p1- czujnik zamocowany w specjalnym adapterze pomiędzy zaworem indykatorowym a kanałem łączącym, p2 - czujnik ciśnienia zamontowany na gwincie zaworu indykatorowego, jest to miejsce montażu najczęściej stosowane w czasie pomiarów ciśnienia cylindrowego w warunkach eksploatacyjnych, p3 - czujnik ciśnienia zamocowany w specjalnie przygotowanym otworze montażowym kołnierza tulei cylindrowej). Pomiar ciśnień cylindrowych były przeprowadzane przy różnych obciążeniach: 15%, 30%, 45%, 60% i 75% mocy nominalnej silnika. Badania zostały przeprowadzone dla silnika bez symulowanych uszkodzeń oraz z symulowanym uszkodzeniem w układzie wtrysku paliwa.

Celem badań właściwych była analiza porównawcza przebiegów ciśnień cylindrowych i parametrów indykowanych sporządzonych na podstawie pomiarów ciśnienia cylindrowego w różnych punktach pomiarowych silnika bez oraz z symulowanymi uszkodzeniami.



Rys. 3. Miejsce zamocowania czujnika ciśnienia w tulei cylindrowej: p3 - miejsce instalacji czujnika ciśnienia

4. Wyniki badań

Pomiary ciśnień cylindrowych zostały odczytane za pomocą urządzenia pomiarowo-rejestrującego przebiegi ciśnień Unitest 2008. Modelem badawczym był okrętowy silnik tłokowy Sulzer 3AL25/30, obciążany za pomocą prądnicy prądu przemiennego w szerokim zakresie obciążeń, na którym podczas badań przeprowadzano następujące symulacje:

S1 - silnik bez symulowanych uszkodzeń

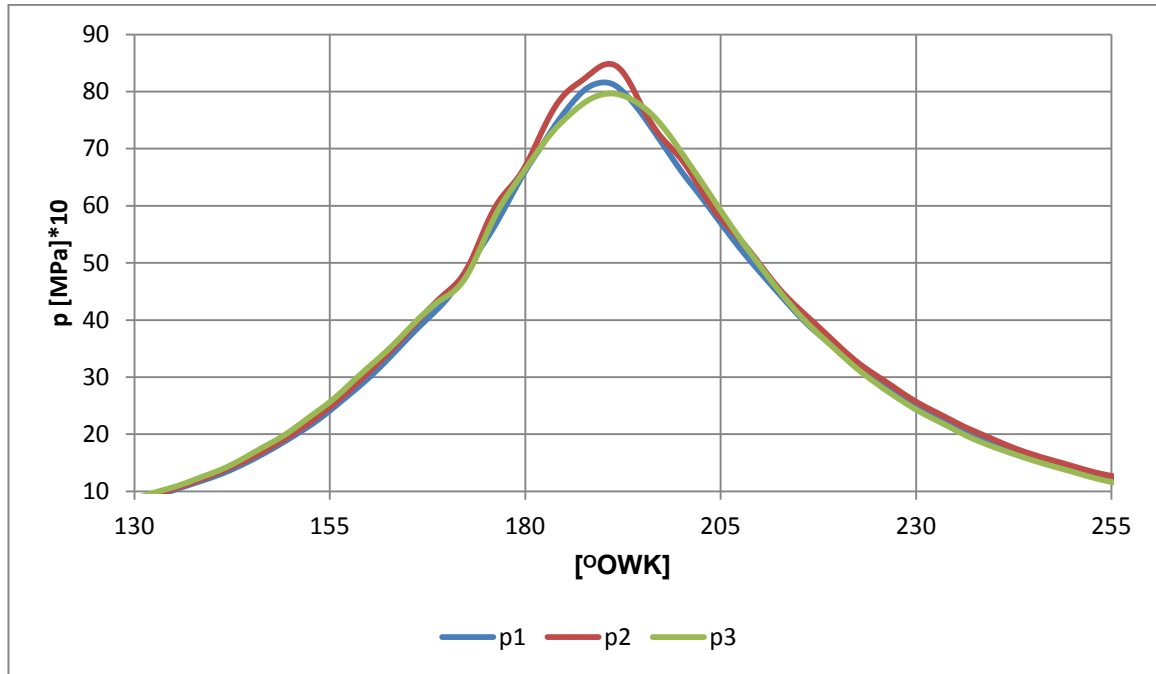
S2 - silnik z symulowanym uszkodzeniem pompy wtryskowej, zawór przelewowy otwarty o 0,125 obrotu,

S3 - silnik z symulowanym uszkodzeniem pompy wtryskowej, zawór przelewowy otwarty o 0,25 obrotu,

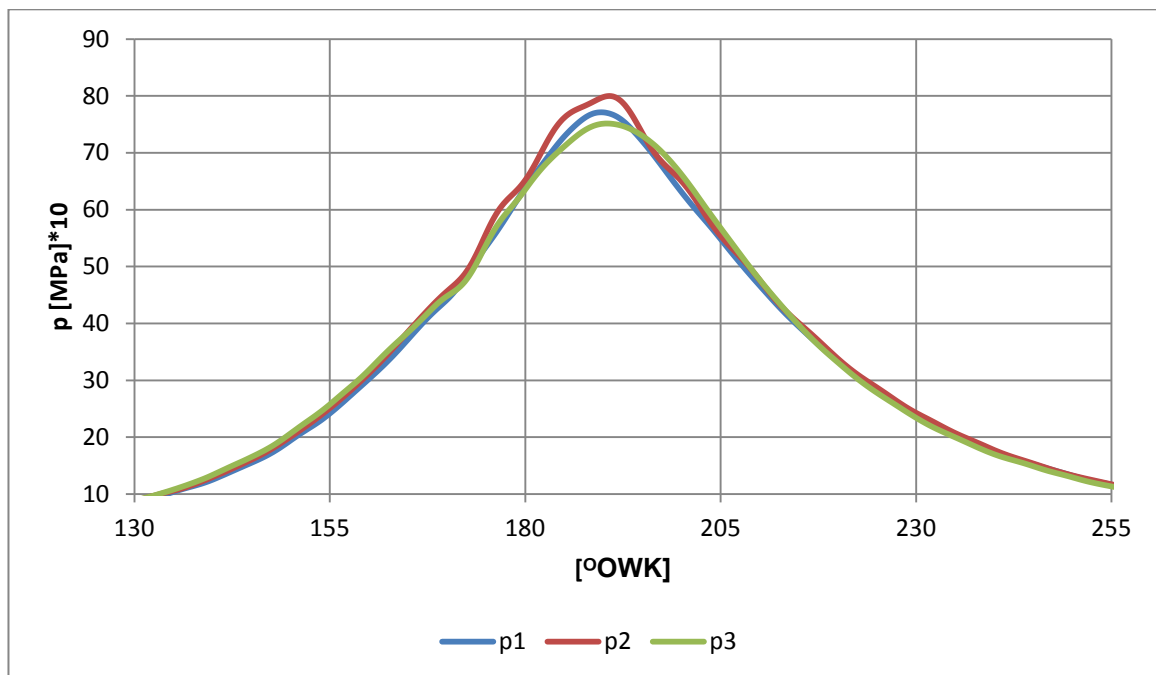
S4 - silnik z symulowanym uszkodzeniem wtryskiwacza, zakosowane cztery z dziewięciu otworów rozpylacza.

Poniżej przedstawione zostały przebiegi zmian ciśnienia cylindrowego dla obciążenia silnika 75% N_n oraz dla silnika technicznie sprawnego i z symulowanymi uszkodzeniami w układzie wtrysku paliwa. Przebiegi ciśnienia cylindrowego z mniejszymi obciążeniami zostały pominięte w artykule. Pozycjonowanie górnego martwego położenia tłoka (GMP) odbyło się za pomocą wyznaczenia pierwszej pochodnej przebiegu ciśnienia sprężania cylindra pierwszego [7, 8, 9]. Dla każdego przebiegu ciśnienia odczytanego z trzech czujników ciśnienia położonych w trzech

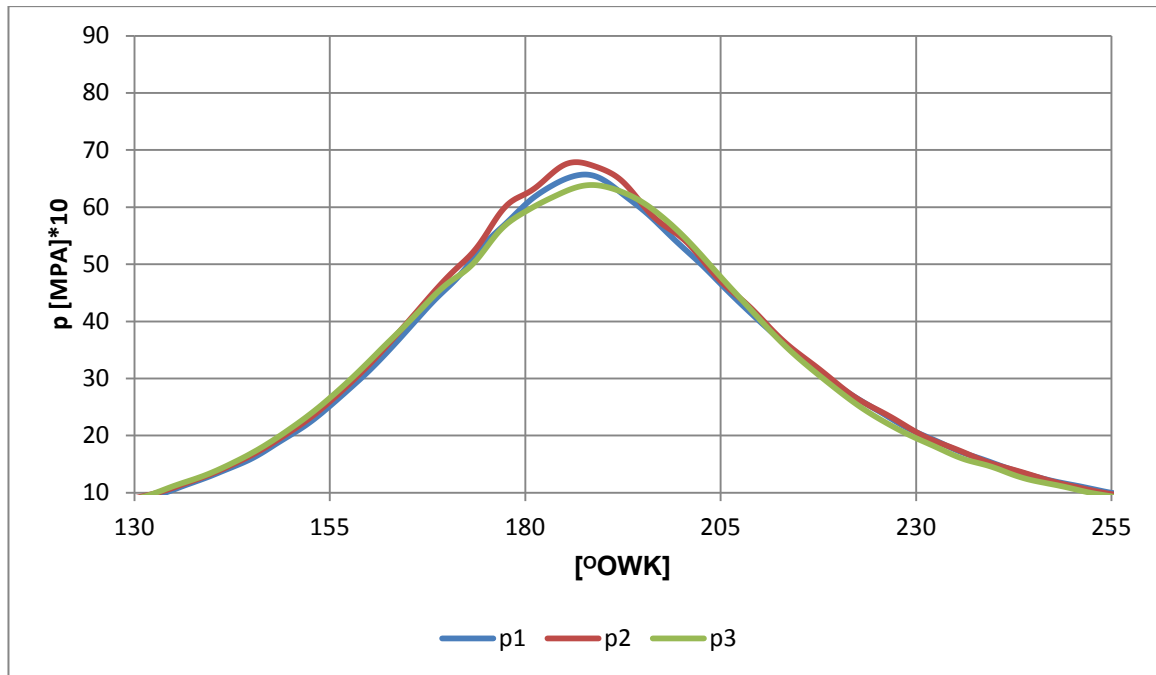
różnych miejscach pomiarowych, pozycjonowanie GMP odbyło się indywidualnie. Do aproksymowania (wygładzania) sporządzonych krzywych ciśnień cylindrowych wykorzystano aproksymację ruchomym wielomianem 3 stopnia do trzech kroków bez przepisywania kolumn [7]. Szerokość przedziału aproksymacji dla każdego przebiegu była stała. Położenie GMP na prezentowanych wykresach odpowiada 180°OWK.



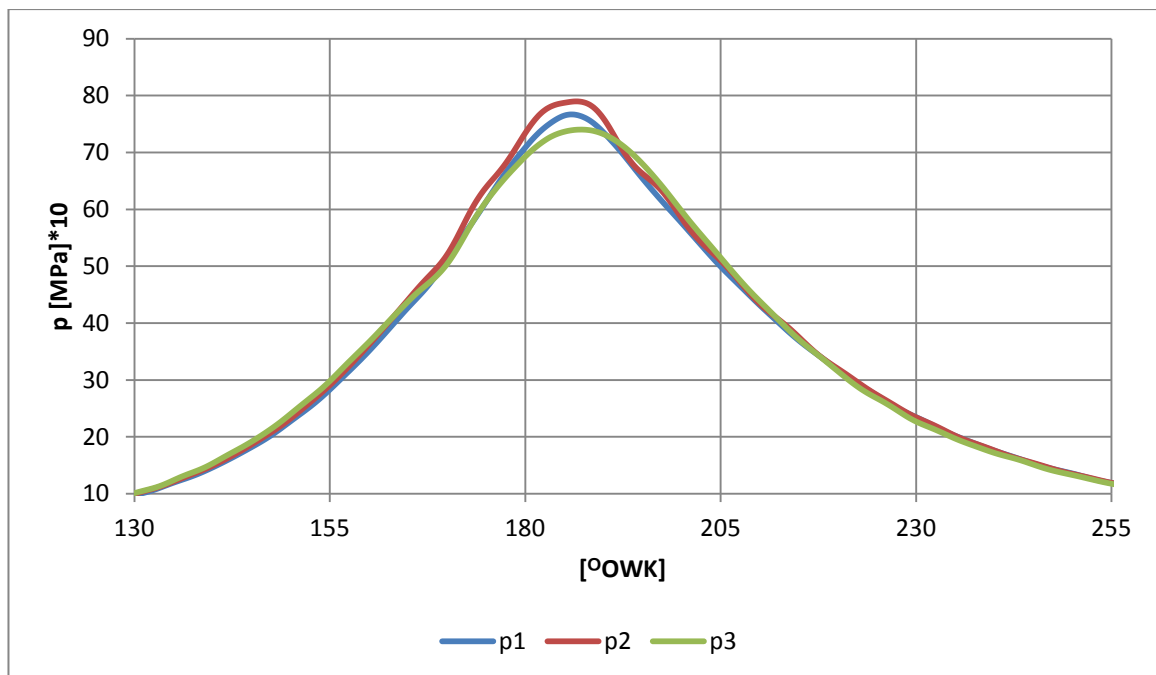
Rys.4 Nalozone na siebie przebiegi cišnienia spalania zarejestrowane w trzech miejscach pomiarowych (p1, p2 i p3) przy obciężeniu 75% N_n silnika bez uszkodzeń S1



Rys.5 Nalozone na siebie przebiegi cišnienia spalania zarejestrowane w trzech miejscach pomiarowych (p1, p2 i p3) przy obciężeniu 75% N_n symulacja uszkodzenia S2



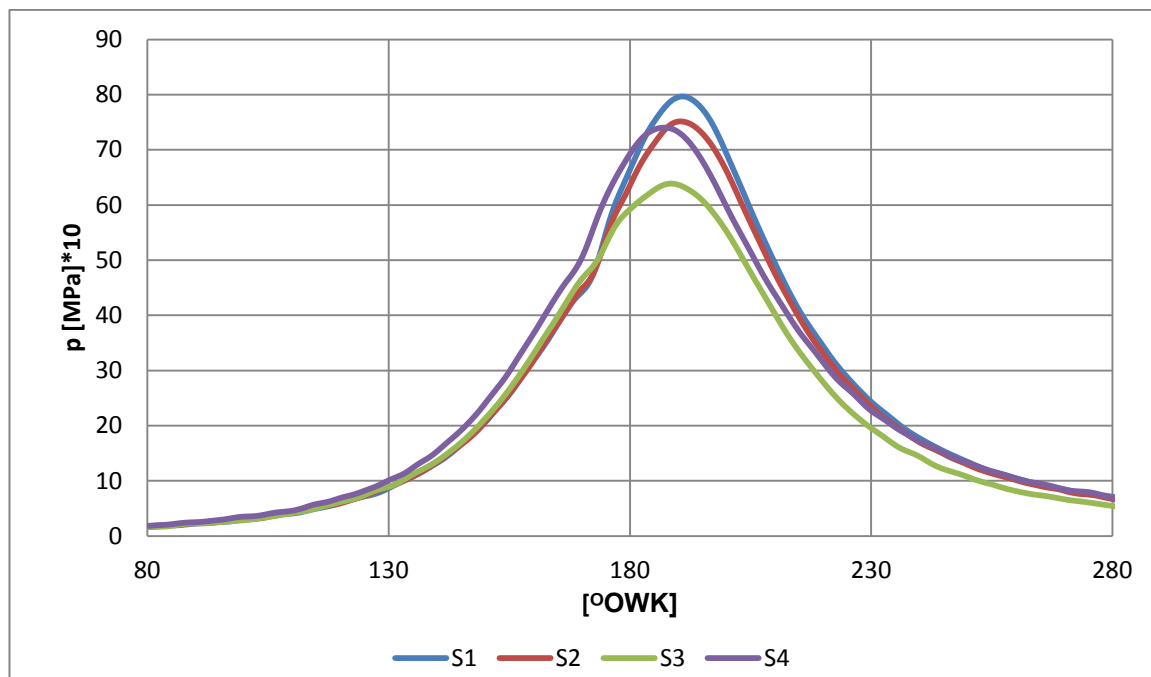
Rys.6 Nalożone na siebie przebiegi ciśnienia spalania zarejestrowane w trzech miejscach pomiarowych (p1, p2 i p3) przy obciążeniu 75% N_n , symulacja uszkodzenia S3



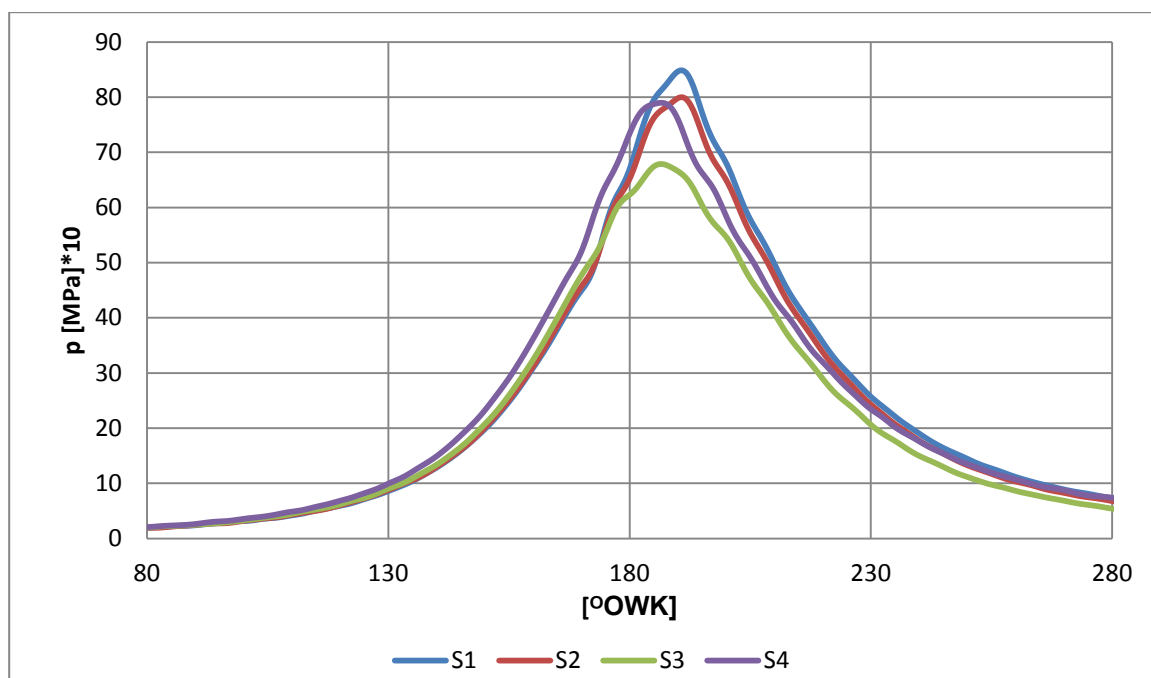
Rys.7 Nalożone na siebie przebiegi ciśnienia spalania zarejestrowane w trzech miejscach pomiarowych (p1, p2 i p3) przy obciążeniu 75% N_n , symulacja uszkodzenia S4

Na rysunkach od 4 do 7 zestawione zostały przebiegi ciśnienia odczytane w trzech miejscach pomiarowych, odpowiednio z symulacjami S1, S2, S3, S4. Wynika z nich, że miejsce pomiaru ma niewielki wpływ na wykres indykatorowy do momentu początku spalania, przebiegi ciśnienia do tego miejsca prawie się pokrywają. Sytuacja zdecydowanie zmienia się po punkcie początku spalania, który dla kolejnych symulacji jest w dużym przybliżeniu podobny. W trakcie procesu spalania krzywe ciśnienia spalania są zróżnicowane przy czym dla pomiarów w punkcie p1 i p2 (w p2 największe) dochodzą jeszcze pewne zniekształcenia krzywej ciśnienia niezależnie od

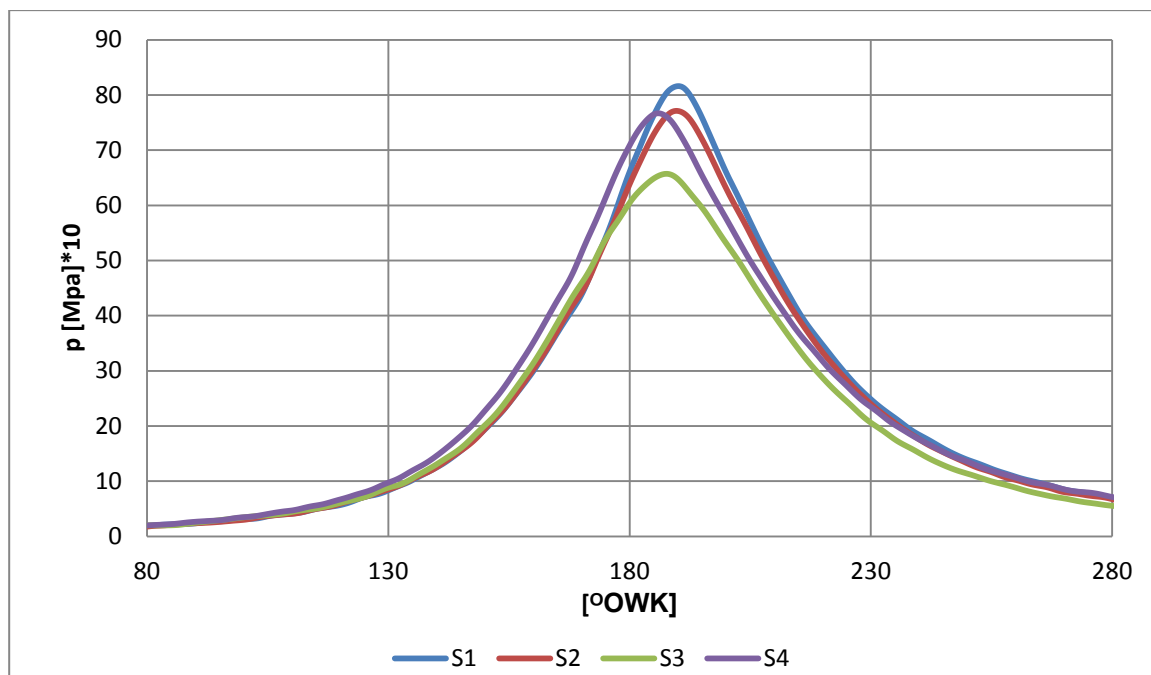
symulacji. Dla wszystkich zestawionych powyżej krzywych ciśnienia dla punktu p3 wartość maksymalnego ciśnienia spalania p_{max} jest najniższa. Na podstawie kształtu krzywej ciśnienia uzyskanej za pomocą czujnika p3 wydaje się, że przejście przez najwyższe ciśnienia spalania jest najłagodniejsze (niezależnie od symulacji) co z punktu widzenia eksploatacji i diagnostyki jest zjawiskiem korzystnym.



Rys.8 Nalożone na siebie przebiegi ciśnienia spalania przy obciążeniu 75% N_n silnika bez uszkodzeń S1 i z symulowanymi uszkodzeniami w układzie wtryskowym S2, S3, S4, odczytane w kołnierzu tulei cylindrowej p3



Rys.9 Nalożone na siebie przebiegi ciśnienia spalania przy obciążeniu 75% N_n silnika bez uszkodzeń S1 i z symulowanymi uszkodzeniami w układzie wtryskowym S2, S3, S4, odczytane na kurku indykatorowym p2



Rys.10 Nalożone na siebie przebiegi ciśnienia spalania przy obciążeniu 75% N_n silnika bez uszkodzeń S1 i z symulowanymi uszkodzeniami w układzie wtryskowym S2, S3, S4, odczytane pomiędzy kurkiem indykatorowym a kanałem pomiarowym w głowicy p1

Na rysunkach 8, 9 i 10 zestawiono przebiegi ciśnień rejestrowane czujnikami w poszczególnych miejscach montażu czujnika ciśnienia. Na każdym z nich naniesiono cztery symulacje uszkodzeń. Największe zniekształcenie krzywych ciśnień cylindrowych zaobserwowano, gdy pomiar ciśnienia odbywał się na gwincie kurka indykatorowego - p2 (rys. 9) pomimo zastosowania tego samego przedziału aproksymacji.

Tab. 1: Wartości kąta obrotu wału korbowego przy występowaniu maksymalnego ciśnienia spalania dla symulowanych uszkodzeń silnika, obciążenie 75% N_n

	S1	S2	S3	S4
	[°OWK]			
p3	190,4	190,6	188,6	187,1
p2	190,8	190,8	186,5	186,6
p1	190,1	189,9	187,9	186,1

Wartości kąta obrotu wału korbowego (°OWK) w tabeli 1 dla maksymalnego ciśnienia spalania odczytano z dokładnością do 0,1 stopnia OWK. Wartości te wyznaczono w oparciu o własne górne martwe położenie tłoka (GMP), czyli dla każdego pomiaru ciśnienia cylindrowego w trzech różnych punktach p3, p2 i p1, wykres indykatorowy został dosunięty na podstawie przebiegu własnej pierwszej pochodnej "czystego" sprężania. Z tego względu wartości °OWK występujące dla p_{max} różnią się nieznacznie dla silnika technicznie sprawnego. Wprowadzone symulacje powodują, że wartości kątowe zmieniają się znacznie, szczególnie w symulacji S3 (jest to symulacja uszkodzenia "patologiczna").

Tab. 2: Wartości maksymalnego ciśnienia spalania p_{max} i średniego ciśnienia indykowanego MIP odczytane z czujników ciśnienia zamontowanych w trzech miejscach pomiarowych przy obciążeniu silnika 75% N_n dla symulowanych uszkodzeń silnika S1, S2, S3, i S4

	S1		S2		S3		S4	
	MIP	p_{max}	MIP	p_{max}	MIP	p_{max}	MIP	p_{max}
	[MPa]*10							
p1	14,934	81,602	14,454	77,108	13,085	65,705	14,918	76,680
p2	15,335	84,83	14,804	79,961	13,333	67,875	15,216	78,944
p3	15,023	79,658	14,594	75,134	13,033	63,874	14,983	74,012

W tabeli 2 przedstawiono wartości średniego ciśnienia indykowanego (MIP) i maksymalnego ciśnienia spalania (p_{max}), odczytane jednocześnie, za pomocą trzech czujników zamontowanych w trzech różnych miejscach pomiarowych. Wartości ciśnień MIP i p_{max} w pierwszej kolejności uśredniono z szesnastu cykli pracy silnika, następnie poddano aproksymacji w wspomniany wcześniej sposób. Pomiar ciśnienia cylindrowego odbywa się co 0.5 °OWK, co wynosi 23040 próbek na jeden pomiar ciśnienia cylindrowego. Pomimo że p_{max} jest najmniejsze dla wszystkich rozpatrywanych przypadków to MIP przyjmuje wartości pośrednie (MIP p1 < MIP p3 > MIP p2). Na wartość MIP duży wpływ ma zarówno wartość p_{max} jak i kształt krzywej przebiegu ciśnienia spalania. Z wyników pomiarów MIP (tab. 2) wynika, że największy wpływ na pomiar tego parametru ma kurek indykatorowy.

Tab. 3: Prędkość narastania ciśnienia spalania w barach na jeden stopień obrotu wału korbowego

	S1 - bez uszkodzeń			S4 - uszk. wtryskiwacz		
	20° - 10°OWK przed GMP	10° - 0°OWK przed GMP	5° przed i 5°OWK za GMP	20° - 10°OWK przed GMP	10° - 0°OWK przed GMP	5° przed i 5°OWK za GMP
	$\Delta p/\Delta \alpha$ [MPa/°OWK]					
p1	1,388	2,137	2,178	1,644	2,039	1,438
p2	1,426	2,229	2,226	1,556	2,107	1,611
p3	1,258	2,142	1,848	1,3	2,03	1,086
	S2 - uszk. pompa wtryskowa 0,125			S3 - uszk. pompa wtryskowa 0,25		
	20° - 10°OWK przed GMP	10° - 0°OWK przed GMP	5° przed i 5°OWK za GMP	20° - 10°OWK przed GMP	10° - 0°OWK przed GMP	5° przed i 5°OWK za GMP
	$\Delta p/\Delta \alpha$ [Mpa/°OWK]					
p1	1,425	1,888	1,803	1,406	1,476	1,075
p2	1,455	1,908	1,162	1,499	1,45	1,226
p3	1,321	1,71	1,316	1,346	1,305	1,012

Tabela 3 przedstawia prędkość narastania ciśnienia spalania $\Delta p/\Delta \alpha$ w MPa na stopień obrotu wału korbowego [MPa/°OWK], dla trzech przedziałów, przy obciążeniu silnika 75% N_n i symulacjach S1, S2, S3 i S4. Przedział pierwszy zawiera się pomiędzy dwudziestym a dziesiątym °OWK przed GMP, przedział drugi to okres od dziesiątego °OWK do GMP, natomiast trzeci to 5° przed GMP do 5° za GMP. Analizując wyniki zawarte w tabeli 3 widać, że parametr $\Delta p/\Delta \alpha$ jest najmniejszy dla silnika technicznie sprawnego i z symulacjami uszkodzeń dla pomiaru w p3.

5. Wnioski

Przeprowadzone dotąd badania na silniku bez symulowanych uszkodzeń i z uszkodzeniami wtryskiwacza oraz pompy wtryskowej wykazały, że:

1. wielkość i geometria kanałów pomiarowych ma wpływ na kształt wykresów indykatorowych oraz na obliczone parametry indykowane (rejestrowane ciśnienia cylindrowe w kołnierzu tulei charakteryzują się najniższymi wartościami p_{\max} , a średnie ciśnienia indykowane mają wówczas wartości wyższe, w stosunku do pomiaru ciśnienia w pozostałych punktach); ma to znaczenie przy obliczaniu mocy z cylindra,
2. powyższe wynika ze znacznego przesunięcia GMP „w lewo” na wykresie indykatorowym, co przede wszystkim jest widoczne podczas symulowania uszkodzenia wtryskiwacza S4,
3. przebiegi ciśnień cylindrowych mierzone w kołnierzu tulei cylindrowej obarczone są mniejszymi zakłóceniami w porównaniu do pomiarów przeprowadzonych za pomocą czujników zamontowanych na i przed zaworem indykatorowym,
4. wprowadzona symulacja uszkodzonego wtryskiwacza i pompy wtryskowej ma wpływ na uzyskane wyniki pomiarów, różny w zależności od punktu pomiaru - dotyczy to zarówno rejestrowanego przebiegu ciśnień cylindrowych, a także odczytywanych i obliczanych parametrów indykowanych,
5. konieczna jest dalsza pogłębiona analiza wykresów indykatorowych i parametrów indykowanych z wykorzystaniem pomiaru ciśnienia bezpośrednio w komorze spalania, również z wykorzystaniem pochodnych przebiegów ciśnień i funkcji wydzielania ciepła,
6. w artykule przedstawiono przebiegi ciśnień spalania z wyznaczeniem GMP na podstawie przebiegu pierwszej pochodnej przebiegu ciśnienia dla każdego z czujników ciśnienia; gdyby odnieść pozycjonowanie GMP względem jednego z miejsc pomiaru to wyniki p_{\max} i MIP oraz krzywe ciśnienia rejestrowane za pomocą pozostałych czujników zdecydowanie różniłyby się od przedstawionych powyżej, co będzie przedmiotem dalszych badań.

Literatura

- [1] Cupiał, K., Dużyński, A., Gruca, M., Grzelka, J., *Some errors of gas engine indication*, Journal of Kones, Vol. 8, No. 1-2, 2001.
- [2] Gałęcki, W., Tomczak, L., *Indykowanie okrętowych silników spalinowych*, Akademia Morska, Dział wydawnictw, Gdynia, 2002.
- [3] H. Cegielski, Zakład przemysłu metalowego, *Instrukcja techniczno - ruchowa silnika okrętowego Sulzer - H. Cegielski typ 3A125*, Poznań.
- [4] Instrukcja obsługi programu Unitest 2008, Gdynia 2009.
- [5] KISTLER, materiały informacyjno - reklamowe firmy, <https://www.kistler.com/en/>
- [6] Piotrowski, I., Witkowski, K., *Okrętowe silniki spalinowe*, Trademar, wydanie 3a, ISBN 83-900731-1-9, Gdynia 2003.
- [7] Polanowski, S., *Studium metod analizy wykresów indykatorowych w aspekcie diagnostyki silników okrętowych*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni, ISSN 0860-889X, Nr. 169A, Gdynia 2007.

- [8] Polanowski, S., Pawletko, R., Witkowski, K., *Influence of pressure sensor location on the quality of thermodynamic parameters calculated from the marine engine indicator diagram*, *Combustion Engines*, 154(3), 319-323. ISSN 0138-0346, 2013
- [9] Tomczak, L., *Wykorzystanie pośredniej metody określania położenia wału korbowego w indykatorze elektronicznym, Praca doktorska*, Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Gdańsk 2001.
- [10] Unitest, materiały informacyjno-reklamowe firmy, <http://www.unitest.pl/>.
- [11] Wajand, J., 1974, *Pomiary szybkozmiennych ciśnień w maszynach tłokowych*, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa.,
- [12] Witkowski, K., *Wykorzystanie analizy charakterystyk wydzielania ciepła do oceny stanu technicznego aparatury wtryskowej silnika okrętowego*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Rozprawy, nr. 490, Poznań 2013.
- [13] Wysocki, J., *Modyfikacja układu do pomiaru przebiegu ciśnienia spalania okrętowego silnika tłokowego Sulzer AL25/30*, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni* nr.108/2018, str 168-180, Gdynia 2018.