



## ANALIZA INFORMACYJNOŚCI DIAGNOSTYCZNEJ SZYBKOZMIENNEJ TEMPERATURY SPALIN WYLOTOWYCH OKRĘTOWEGO SILNIKA TŁOKOWEGO - KLASYFIKACJA JEDNOCZYNNIKOWA

Patrycja Puzdrowska

Politechnika Gdańska  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa  
Zakład Siłowni Okrętowych  
80-233 Gdańsk ul. G. Narutowicza 11/12  
e-mail: patpuzdr@pg.edu.pl

### ABSTRAKT

W niniejszym artykule zwrócono uwagę na problem niskiej podatności kontrolnej okrętowych silników średnio- i szybkoobrotowych w eksploatacji, co znacznie ogranicza możliwości diagnozowania parametrycznego ich przestrzeni roboczych oraz układu wtrysku paliwa. W celu rozwiązania tego problemu zaproponowano pomiar szybkozmiennej temperatury spalin wylotowych z silnika, której przebieg po odpowiedniej obróbce matematycznej oraz analizie statystycznej i merytorycznej może być cennym źródłem informacji diagnostycznej. Jako narzędzie statystyczne wybrano statystykę  $F$  rozkładu Fishera - Snedecora, pozwalającą ocenić, czy analizowany czynnik wejściowy (wymuszający), w tym wypadku parametr struktury konstrukcyjnej silnika wpływa na czynnik wyjściowy (wynikowy), jakim jest miara diagnostyczna wyznaczona na podstawie pomiaru szybkozmiennej temperatury spalin wylotowych i jaka jest siła tego oddziaływania. Badania laboratoryjne przeprowadzono na stanowisku jednocylindrowego silnika Farymann Diesel typu D10. Polegały one na wprowadzaniu faktycznych zmian w strukturze konstrukcyjnej rozpatrywanych układów funkcjonalnych silnika badawczego, odwzorowujących stany ich częściowej zdadności do realizacji funkcji celu działania. W zrealizowanym programie badań rozpatrywano trzy zmieniane parametry struktury: czynne pole przekroju przepływu kanału powietrza dolotowego, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza oraz stopień kompresji, co miało odzwierciedlać znane i rozpoznawalne uszkodzenia silnika najczęściej występujące na obiektach rzeczywistych, tzn. pełnowymiarowych silnikach okrętowych. Na podstawie uzyskanych przebiegów szybkozmiennej temperatury spalin wylotowych zdefiniowano trzy miary diagnostyczne, których informacyjność poddano testom statystycznym: uśrednione w obrębie jednego cyklu pracy 4-suwowego silnika tłokowego: wartość międzyszczytową temperatury spalin, jednostkową entalpię spalin opuszczających cylinder oraz szybkość wzrostu oraz spadku wartości szybkozmiennej temperatury spalin. Największą wrażliwość diagnostyczną na wprowadzone zmiany czynnego pola przepływu powietrza dolotowego wykazała jednostkowa entalpia spalin. Obniżone ciśnienie otwarcia wtryskiwacza wpływało istotnie pod względem statystycznym na wartość międzyszczytowej temperatury spalin oraz szybkość wzrostu oraz spadku wartości szybkozmiennej temperatury spalin. Natomiast zmniejszona wartość stopnia kompresji skutkowała istotnym wpływem na wszystkie trzy wyznaczone miary diagnostyczne.

W artykule przedstawiono reprezentatywne wyniki pierwszego etapu badań eliminacyjnych, a mianowicie analizę statystyczną jednoczynnikową zgodnie z realizowanym planem randomizowanym kompletnym. Planuje się prace nad drugim etapem badań eliminacyjnych obejmujących analizę dwuczynnikową, zgodnie z planem randomizowanym blokowym, gdzie dokonana zostanie ocena istotności wpływu zmienianych wartości parametrów struktury na analizowane miary diagnostyczne, w tle zmiennego obciążenia silnika.

**Słowa kluczowe:** okrętowy silnik tłokowy, temperatura spalin, informacyjność diagnostyczna, statystyka  $F$  rozkładu Fishera - Snedecora

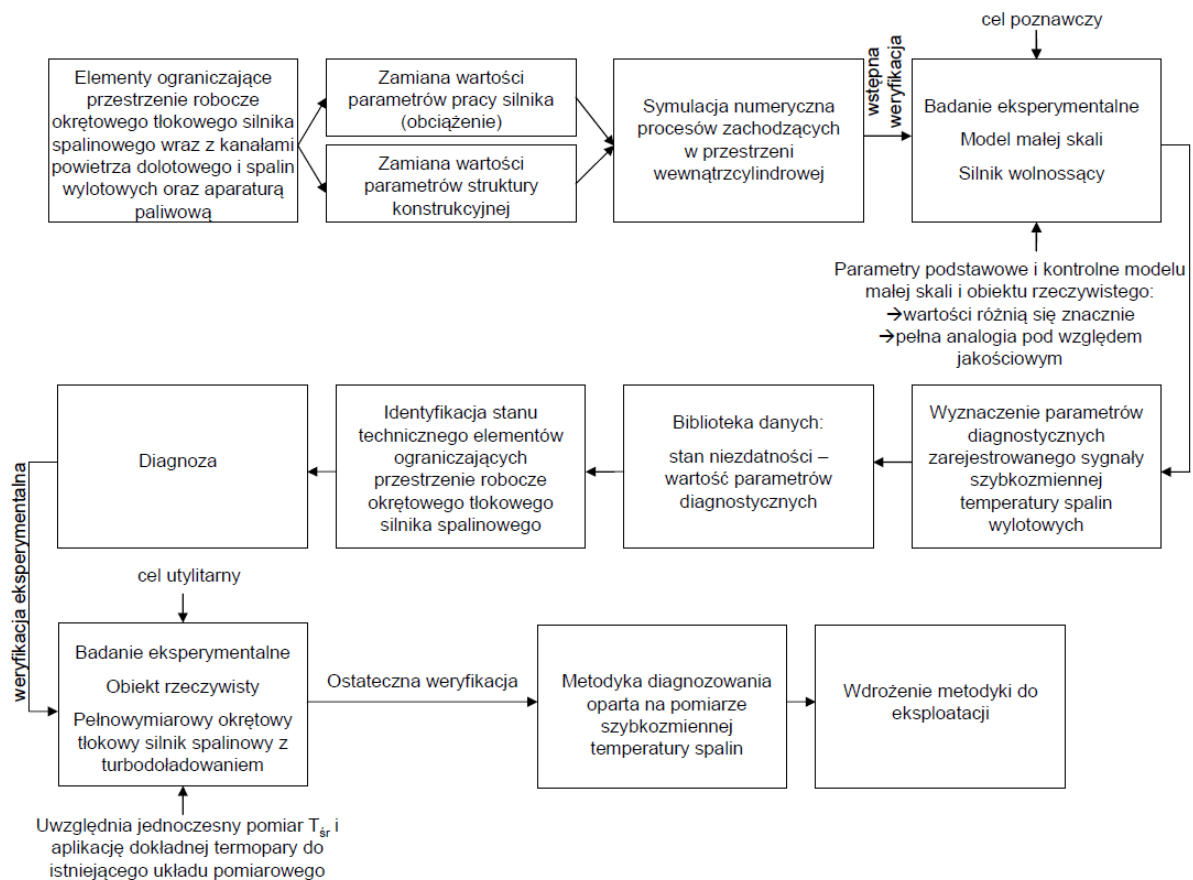
## 1. Wstęp

Temperatura spalin wylotowych jest podstawowym symptomem diagnostycznym okrętowego silnika tłokowego, zarówno tego pracującego jako napęd główny statku, jak i będącego elementem elektrowni okrętowej. Jest to parametr charakteryzujący przede wszystkim jakość procesu przemiany energii chemicznej paliwa w energię mechaniczną w wyniku złożonych procesów fizykochemicznych zachodzących w jego komorze spalania. Temperatura spalin określa także sprawność procesów termodynamicznych zachodzących w wydzielonych przestrzeniach gazowych układu cieplno-przepływowego silnika podczas transportu czynnika roboczego. Informacyjność diagnostyczna temperatury spalin wylotowych jest ściśle zależna od miejsca i dokładności realizowanego pomiaru.

Obiektem badania diagnostycznego są w omawianym przypadku elementy konstrukcyjne ograniczające przestrzenie robocze okrętowego tłokowego silnika (komora spalania, kanały: powietrza dolotowego i spalin wylotowych), a także jego aparatura wtryskowa. Większość tłokowych silników okrętowych ze względu na wymagania towarzystw klasyfikacyjnych posiada ściśle określone miejsca standardowego pomiaru temperatury spalin wylotowych [Polski Rejestr Statków, 2016 i 2019; IACS, 2016]. W przypadku silników głównych tworzących napęd statku wymagany jest pomiar temperatury spalin wylotowych za każdym cylindrem, a także jej odchylenie od wartości średniej dla całego silnika (lub bloku cylindrowego) [IACS, 2016: M35]. W przypadku silników okrętowych napędzających prądnice, o mocy powyżej 500 kW przypadającej na każdy cylinder, również wymagany jest pomiar temperatury spalin za każdym z cylindrów [IACS, 2016: M36]. Gdy silnik jest wyposażony w impulsowy układ turbodoładowania, wówczas miejsca pomiaru standardowego temperatury spalin znajdują się przed i za turbiną turbosprężarki [IACS, 2016: M73]. Stosuje się do tego celu tradycyjne termopary o znacznej inercyjności pomiarowej (stałe czasowe rzędu dziesiątych części sekundy i więcej), z których uzyskuje się wartość uśrednioną okresowo zmiennego przebiegu temperatury strumienia spalin wylotowych [Korczewski, 2017]. Mierzona w stanach ustalonego obciążenia silnika temperatura spalin wylotowych jest zazwyczaj rejestrowana jako wartość statyczna. Dokonując oceny informacyjności diagnostycznej tego parametru, w aspekcie dogłębności i wiarygodności stawianej diagnozy o stanie technicznym silnika, jest ona zdecydowanie wyższa w przypadku realizacji pomiarów dynamicznych. Obserwacja procesów mikrodynamicznych (szybkodziennych) w obrębie pojedynczego cyklu pracy silnika, w stanie pracy ustalonej, pozwala na dokładniejszą diagnozę. Temperatura uśredniona, rejestrowana standardowymi termoparami oraz jej odchylenia o dopuszczalną, ustaloną przez producenta wartość, nie przynosi tak wielu informacji o przebiegu procesu spalania i stanie technicznym układu zasilania paliwem oraz przestrzeni ograniczających komorę spalania, jak temperatura szybkozmienna i wyznaczone na jej podstawie parametry diagnostyczne. Dlatego wykorzystując miejsce standardowego pomiaru temperatury spalin możliwe jest umieszczenie w nim specjalnej termopary, o stałej czasowej rzędu kilkudziesięciu a nawet kilku milisekund i uzyskanie większej ilości informacji diagnostycznej. Musi być jednocześnie zapewniona sposobność obserwacji uśrednionej wartości temperatury spalin wylotowych w czasie pracy silnika. Wymaganie to nie stanowi obecnie większego problemu eksploatacyjnego, biorąc pod uwagę możliwości metrologiczne współcześnie stosowanych, przenośnych systemów diagnozujących [Korczewski, 2017].

W badaniach realizowanej przez autorkę niniejszego artykułu analizowane są procesy termodynamiczne zachodzące w przestrzeniach wewnątrzcyndrowych silnika Diesla, który traktowany jest jako generator szybkozmiennego sygnału temperatury spalin wylotowych. Badania eksperymentalne prowadzone są na jednocylindrowym silniku wolnossącym, będącym modelem małej skali obiektu rzeczywistego, jakim jest pełnowymiarowy silnik okrętowy z turbodoładowaniem. Obserwowane parametry podstawowe i kontrolne różnią się znacząco, co do

wartości (efekt małej skali), jednak występuje znacząca analogia procesów termodynamicznych zachodzących w obu silnikach pod względem jakościowym (rys. 1).



Rys. 1. Schemat realizacji badań procesów ciepłno-przepływowych w kanale wylotu spalin dla celów diagnostyki elementów ograniczających przestrzeń robocze silnika okrętowego

Problematyką szybkozmiennych temperatur gazów zajmuje się wiele zespołów badawczych. Przykładowo, dr inż. A. Olczyk zaproponował metodę, której istotą jest zastosowanie dwóch przetworników temperatury: w „słabszym” torze umieszczono odsłoniętą miniaturową termoparę typu „E” (nikielchrom-konstantan NiCr-CuNi) wykonaną z drutu o średnicy 0,05mm, w „silniejszym” termometr typu CCT (ang. *Constant Current Thermometer*) wykonany z drutu wolframowego o średnicy 5µm. Były to przetworniki o różnej (nieznanej z góry) inercyjności, mierzące ten sam sygnał wejściowy. Autor proponuje zastosowanie do pomiarów odpowiednio zaadaptowanej sondy Prandtla, w której oprócz klasycznego pomiaru ciśnienia całkowitego i statycznego istnieje dodatkowo możliwość jednoczesnego pomiaru temperatury statycznej gazu (składowa dynamiczna temperatury nie ma wpływu na wskazanie termopary). Pomiar ten jest realizowany za pomocą miniaturowej termopary, umieszczonej w miejscu odpowiadającym pomiarowi ciśnienia statycznego (na obwodzie końcówki pomiarowej sondy Prandtla) i odizolowanej cieplnie od sondy [Olczyk, 2007]. Natomiast dr M. Jaremkiewicz w swojej pracy doktorskiej, której promotorem był prof. dr hab. inż. J. Taler, zaproponowała odznaczające się wysoką dokładnością metody pomiaru nieustalanej temperatury przepływających gazów. Jako kluczowy problem badawczy identyfikowany podczas pomiaru temperatury gazu, którego temperatura zmienia się w czasie, postawiono występowanie dużych różnic pomiędzy rzeczywistą temperaturą gazu i tę wyznaczaną przez czujnik. Przedstawione zostały rozwiązania odwrotnych

zagadnień nieustalanej wymiany ciepła w trybie on-line, występujących przy pomiarze nieustalonej temperatury gazu [Jaremkiewicz, 2011 i 2016].

Tematykę pomiarów szybkozmiennych temperatur gazów, jako parametru diagnostycznego opartych na badaniach laboratoryjnych, w czasie których stosowano do pomiarów dwie termopary o różnych średnicach wykonanych z materiału o dobrej przewodności i małej bezwładności cieplnej, opartej na propozycji H. Pfriema z 1936 roku, podejmowało również wcześniej kilka innych zespołów badawczych [Pfriem, 1936; Tagawa i Ohta, 1997; Roberts i Stone, 2004; Brown i inni, 2008; Morey i Seers, 2010]. Prace tych Autorów pozwoliły na poszerzenie wiedzy metrologicznej związanej z pomiarami szybkozmiennych temperatur gazów przepływających z dużą prędkością, rzędu kilkudziesięciu m/s, jak to ma miejsce w kanale spalin wylotowych silnika tłokowego [Korczewski, 2017].

Z kolei przez doc. S. Rutkowskiego podejmowane były pierwsze w Polsce próby w zakresie pomiarów szybkozmiennych temperatur spalin wylotowych silnika o zapłonie samoczynnym dla celów diagnostycznych [Rutkowski, 1976]. Dysponując bardzo zaawansowanym, jak na lata siedemdziesiąte ubiegłego wieku, analogowym układem pomiarowym (oscylograf pętlicowy) Autor publikacji rejestrował przebiegi zmienności temperatury spalin wylotowych jednocylindrowego, czterosuwowego silnika laboratoryjnego, mierzonej bezpośrednio za zaworem wylotowym, na tle rozwiniętego wykresu indykatorowego. Głównym celem realizacji badań, było określenie relacji diagnostycznych pomiędzy spadkiem ciśnienia sprężania czynnika w cylindrze i dynamiką zmian obserwowanej temperatury spalin wylotowych.

Wielu autorów zajmuje się odtwarzaniem przebiegu temperatury spalin wylotowych silnika o ZS w sposób analityczny, na podstawie zarejestrowanego w czasie badań eksperymentalnych wykresu indykatorowego [Wisłocki, 2004; Polanowski, 2007; Zacharewicz, 2010; Witkowski, 2011; Korczewski i Zacharewicz, 2012]. Autorzy ci zaproponowali metody diagnozowania przestrzeni roboczych silnika okrętowego, jednak żaden nie dokonywał tego na podstawie bezpośrednio pomiaru temperatury spalin wylotowych. Dostępne są także w literaturze specjalistycznej wyniki prac badawczych, w których autorzy wyznaczają w sposób analityczny temperaturę spalin, jednak na podstawie pomiarów optoelektronicznych temperatury płomienia w komorze spalania silnika laboratoryjnego, wskazując przy tym na liniową zależność pomiędzy jego temperaturą i temperaturą spalin wylotowych [Hotger i inni, 1992; Kowalczyk, 2000]. Wyniki badań przeprowadzonych przez prof. M. Kowalczyka na jednocylindrowym silniku badawczym SB 3.1 pozwoliły mu określić następującą zależność empiryczną:

$$\frac{T_g}{T_f} = 3,12 \cdot 10^{-4} \cdot T_g + 0,13 \quad (1)$$

gdzie:  $T_g$  – temperatura gazu w cylindrze,  $T_f$  – temperatura płomienia.

Jednakże pomiar temperatury płomienia jest dużo trudniejszy do zrealizowania w diagnostyce silników pracujących na statku niż pomiar temperatury spalin w kanale wylotowym.

Odnosząc się zatem do istniejących, wcześniej opracowanych metod badawczych, obliczeniowych i analitycznych autorka niniejszego artykułu proponuje w swojej pracy rozwiązanie dotąd w takim zakresie nie stosowane. Opiera się ono na następującej tezie badawczej: „Trwałość i niezawodność okrętowego tłokowego silnika spalinowego jest zdeterminowana głównie jakością procesu spalania paliwa. Istnieje wiele możliwych przyczyn zakłóceń tego procesu, których obserwowalnym skutkiem są deformacje przebiegu zmienności temperatury spalin mierzonej na wylocie z cylindrów, a także w charakterystycznych przekrojach kontrolnych kanału spalin wylotowych. Pomijając wpływ własności fizykochemicznych paliwa deformacje te stanowią zazwyczaj konsekwencje zużycia (lub tylko zanieczyszczenia) aparatury wtryskowej, a także elementów konstrukcyjnych ograniczających przestrzenie robocze silnika. Są

to procesy ciągłe zawsze towarzyszące eksploatacji silników w warunkach okrętowych. Możliwe jest zatem potraktowanie zarejestrowanego sygnału temperatury spalin wylotowych jako okresowo zmiennego sygnału diagnostycznego (okres jest równy czasowi trwania pojedynczego cyklu pracy silnika), dla którego można wyznaczyć estymatory (cechy dynamiczne) stanu technicznego układów funkcjonalnych silnika”.

Jako główne cele poznawcze w badaniach określono odtworzenie rzeczywistego przebiegu szybkozmiennnej temperatury spalin wylotowych silnika metodą modelowania matematycznego procesu wymiany ciepła w termoparze, a także identyfikację znanych i rozpoznawalnych uszkodzeń tłokowego okrętowego silnika spalinowego, które w konsekwencji mają bezpośredni lub pośredni wpływ na przebieg procesu spalania. Celem użytkowym prowadzonych badań jest opracowanie metodyki badań diagnostycznych silnika okrętowego w warunkach eksploatacji na podstawie pomiarów szybkozmiennnej temperatury spalin wylotowych.

## **2. Szybkozmienna temperatura spalin wylotowych jako parametr diagnostyczny**

Podczas pomiarów szybkozmiennnej temperatury spalin występuje szereg problemów, które należy rozpatrzyć i częściowo lub całkowicie wyeliminować, chcąc uzyskać jak najwięcej informacji diagnostycznej z tego parametru. Jednym z podstawowych zakłóceń mających istotny wpływ na dokładność otrzymanych wyników pomiaru temperatury gazu jest inercyjność zastosowanego czujnika pomiarowego. Najczęściej stosowanymi do tego typu pomiarów są termopary typu K (chromel-alumel), które wykonywane są w płaszczu elementu pomiarowego lub bez niego. Aby inercyjność pomiaru była jak najmniejsza należy dążyć do zastosowania jak najcieńszego drutu termoelektrod, pamiętając jednak o spadku jego odporności na uszkodzenia i trwałości wraz ze zmniejszaniem średnicy. Termopara bez osłony elementu pomiarowego ma mniejszą trwałość od termopary z osłoną, jednak zarazem mniejszą inercyjność. Wielkością determinującą inercyjność termopary jest jej stała czasowa zależna od rozmiarów i mechanicznej konstrukcji termoelektrod, własności termofizycznych zastosowanego materiału oraz właściwości termodynamicznych i charakteru przepływu gazu. Ważnym czynnikiem mającym wpływ na dokładność pomiarów temperatur szybkozmiennych jest sposób montażu czujnika. Główną przeszkodą jest nagrzewanie się termopary od materiału kanału przepływowego (lub innego elementu podtrzymującego), w który jest ona podczas pomiaru wkręcona lub wlutowana. Ma to decydujący wpływ na wyniki pomiarów. Jedyną metodą zapobiegającą lub znacznie zmniejszającą tego typu zakłócenie jest skuteczna izolacja czujnika, np. na drodze zastosowania osłony chłodzonej lub izolowanej materiałem ceramicznym. Pierwsze rozwiązanie wiąże się jednak z możliwością wystąpienia nieszczelności i przedostania się wody do kanału przepływowego, obie metody natomiast zwiększają koszt, ale i dokładność pomiarów. Najtrudniejsze z punktu widzenia metrologicznego są dobór miejsca i sposób montażu termopary do pomiaru szybkozmiennnej temperatury spalin wylotowych, gdy mowa o silniku okrętowym pracującym w rzeczywistych warunkach eksploatacji (w siłowni okrętowej). Najkorzystniejszym rozwiązaniem jest zaadaptowanie do tego celu standardowej termopary układu pomiarowego silnika.

Pomiar szybkozmiennnej temperatury spalin w miejscu pomiaru standardowego wydaje się być najkorzystniejszym rozwiązaniem, ponieważ diagnosta nie ingeruje wówczas w konstrukcję przestrzeni roboczych silnika. Należy jednak uwzględnić następujące czynniki:

- opóźnienie sygnałów względem przebiegu temperatury zarejestrowanego wewnątrz cylindra i deformacje rejestrowanych sygnałów,
- opory przepływu w kanale spalin wylotowych, w zależności od jego formy konstrukcyjnej oraz stanu technicznego powierzchni wewnętrznej,
- zjawiska falowe zachodzące w kanale (interferencja i odbicia fal ciśnienia pochodzących od pozostałych cylindrów współpracujących z danym kanałem zasilającym turbosprężarkę) [Korczewski, 2017],

- sprężanie adiabatyczne słupa gazu znajdującego się przed kolejnymi impulsami spalin opuszczających cylindry silnika [Korczewski, 2017].

Spośród wielu układów funkcjonalnych silników okrętowych, jako najczęściej ulegające uszkodzeniom, autorzy wskazują: układ zasilania paliwem oraz układ wymiany czynnika roboczego [Witkowski, 2017]. W przypadku układu zasilania paliwem dochodzi do uszkodzenia wtryskiwaczy (zużycie stożka iglicy, zużycie i zakokosowanie otworów rozpylacza czy utrata sprężystości własnej sprężyny, objawiająca się spadkiem ciśnienia otwarcia wtryskiwacza), ale także pomp wtryskowych (nieszczelność zaworów zwrotnych, nieszczelność pary precyzyjnej czy zakleszczenia nurników pomp) czy przewodów paliwowych. Natomiast, gdy mowa o zaworach cylindrowych, będących najbardziej obciążonymi cieplnie i mechanicznie częściami konstrukcyjnymi silnika, najczęściej dochodzi do zużycia ściernego prowadnicy, co skutkuje przekoszeniem zaworu, a w konsekwencji nawet do pęknięcia trzonka zaworowego. Innym często spotykanym uszkodzeniem układu wymiany czynnika roboczego są pęknięcia zmęczeniowe sprężyn dociskających [Korczewski, 2017]. Inne uszkodzenia dotyczące układu tłokowo-korbowego czy łożysk, a także zakłócenia procesu spalania, mogą objawiać się jako obniżenie stopnia kompresji  $\varepsilon$ . W przypadku ustalonej pracy tłokowego silnika okrętowego spadek stopnia kompresji, wynikający ze zwiększonej pojemności komory spalania powinien być alarmujący. Może on świadczyć np. o zużyciu łożysk układu korbowego albo łożysk sworzni tłokowych, które sprawia, że skraca się droga tłoka podczas suwu sprężania na skutek sumowania się zwiększonych luzów w łożyskach [Włodarski, 1995]. Inną przyczyną spadku stopnia kompresji może być także uszkodzenie korbowodu w postaci zgięcia lub wyboczenia trzonu korbowodu [Mijas; Reiter i Kukielka, 2013]. Występowanie zbyt dużej ilości sadzy w przestrzeni wewnątrzcyldrowej, powstałej w wyniku niecałkowitego spalania paliwa, powoduje natomiast zmniejszenie pojemności komory spalania, a zatem wzrost stopnia kompresji [Debnath, 2013; Woś, 2016].

Podczas badania diagnostycznego silnika w stanie ustalonej pracy rejestruje się wartości parametrów kontrolnych: wejściowych i wyjściowych. Dla potrzeb wnioskowania diagnostycznego wybiera się te spośród parametrów wyjściowych  $Y$ , które reagują silniej na zmiany wartości parametrów struktury konstrukcyjnej  $S$  niż na zmiany wartości parametrów wejściowych  $X$  wymuszających realizowany proces roboczy. Otrzymuje się w ten sposób zbiór parametrów diagnostycznych  $D$ : niezależnych i zupełnych. Podstawowym warunkiem wyboru odpowiednich parametrów diagnostycznych jest znacznie większa wrażliwość parametru wyjściowego względem parametru struktury  $W_S^Y$  od jego wrażliwości względem parametru wejściowego  $W_X^Y$ . Porównywanie wrażliwości wielu parametrów kontrolnych, podawanych w różnych jednostkach miary, wymusza konieczność przyjmowania do tego celu względnych wartości parametrów wejściowych  $\delta X$ , wyjściowych  $\delta Y$  i struktury  $\delta S$  [Korczewski, 2017]:

$$W_S^Y = \frac{\delta Y}{\delta S} = \frac{\frac{\Delta Y}{Y_0}}{\frac{\Delta S}{S_0}} = \frac{\frac{Y_{pom} - Y_0}{Y_0}}{\frac{S_{pom} - S_0}{S_0}} \gg W_X^Y = \frac{\delta Y}{\delta X} = \frac{\frac{\Delta Y}{Y_0}}{\frac{\Delta X}{X_0}} = \frac{\frac{Y_{pom} - Y_0}{Y_0}}{\frac{X_{pom} - X_0}{X_0}} \quad (2)$$

gdzie:  $Y$  - parametr wyjściowy,  $X$  - parametr wejściowy,  $D$  - parametr diagnostyczny,  $S$  - parametr struktury konstrukcyjnej,  $W_S^Y$  - wrażliwość parametru wyjściowego względem parametru struktury,  $W_X^Y$  - wrażliwość parametru wyjściowego względem parametru wejściowego,  $0$  - parametr początkowy,  $pom$  - parametr pomiarowy,  $\delta$  - wartość względna parametru

Istnieje wiele metod oceny istotności wpływu zmian parametrów struktury na przebieg analizowanego procesu fizycznego i wartości parametrów wyjściowych (diagnostycznych). Należą do nich m.in. pojęcie znane z klasycznej analizy matematycznej, jakim jest odległość pomiędzy funkcjami, entropia informacyjna pochodząca z jakościowej teorii informacji, a także

nieparametryczne i parametryczne testy statystyczne [Shannon, 1945; Mazur, 1970; Kudrewicz, 1976; Korczewski, 2017; Korzyński, 2017]. Parametr kontrolny silnika Diesla, jakim jest szybkościenna temperatura spalin wylotowych może być cennym źródłem informacji diagnostycznej pod warunkiem odpowiedniego przygotowania metodyki oceny stanu technicznego opartej na tym parametrze [Morey i Seers, 2010]. Chcąc osiągnąć ten cel istotne są odpowiednio dobrane: technologia pomiaru, a także narzędzia obróbki matematycznej oraz metody analizy statystycznej i merytorycznej uzyskanych wyników.

## 2.1. Statystyka F rozkładu Fishera – Snedecora jako narzędzie do oceny istotności wpływu

W przypadku oceny istotności wpływu jednego parametru wejściowego silnika (struktury konstrukcyjnej) na jeden parametr wyjściowy (szybkościenna temperatura spalin wylotowych) opracowano program eksperymentu statycznego, randomizowanego kompletnego, przy zastosowaniu do analizy statystyki F rozkładu Fishera- Snedecora<sup>1</sup>, ponieważ spełnione zostały warunki zastosowania jednostronnych testów parametrycznych [Polański, 1984; Korzyński, 2017]. Hipoteza zerowa, formułowana z góry i weryfikowana w badaniach statystycznych, zakłada brak wpływu czynnika wejściowego na czynnik wynikowy. Wpływ czynnika wejściowego uważa się za istotny, gdy wartość obliczeniowa przyjętej statystyki jest równa lub większa od wartości krytycznej, podawanej w tablicach dla przyjętej wartości poziomu istotności i liczby stopni swobody. W prowadzonych badaniach założono z góry, że wyniki pomiarów wszystkich parametrów kontrolnych można zamodelować jako zmienne losowe o rozkładzie normalnym, o określonej wariancji będącej miarą rozrzutu wokół wartości średniej. Przyjęto także, że wariancje zmiennych losowych są równe lub zbliżone co do wartości, a zastosowane testy parametryczne dotyczące wariancji są z jednostronnym obszarem krytycznym.

W przypadku analizy jednoczynnikowej (plan randomizowany kompletny) przeprowadzono ocenę istotności wpływu czynnika wejściowego, będącego parametrem struktury, rozpatrywanego w badaniach w określonym przedziale zmienności, według charakterystyki regulatorowej na wyznaczany parametr diagnostyczny (czynnik wyjściowy).

Wartość testową (obliczeniową) statystyki F rozkładu Fishera – Snedecora wyznacza się (w tym przypadku dla entalpii właściwej spalin jako czynnika wyjściowego) na podstawie następującej zależności:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^p n_i \cdot (\bar{h}_i - \bar{h})^2 \cdot (n - p)}{[\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q (h_{ij} - \bar{h})^2 - \sum_{i=1}^p n_i \cdot (\bar{h}_i - \bar{h})^2] \cdot (p - 1)} \quad (3)$$

gdzie:  $n_i$  – liczba pomiarów entalpii właściwej na danym poziomie,  $n$  – całkowita liczba pomiarów,  $\bar{h}_i$  – średnia entalpia właściwa z wyników pomiarów w  $i$ -tym wierszu,  $\bar{h}$  – średnia entalpia właściwa wyników ze wszystkich pomiarów,  $h_{ij}$  – wartość  $j$ -tej entalpii właściwej na poziomie  $i$ ,  $p$  – liczba poziomów zmienności czynnika wejściowego

Jako dopełnienie analizy statystycznej określono wartości  $\Delta F$ , będące różnicą pomiędzy wartością statystyki  $F_{obl}$ , obliczoną dla badanego czynnika wejściowego, z wartością krytyczną dla założonych wartości stopni swobody licznika i mianownika oraz poziomu istotności:

$$\Delta F = F_{obl} - F_{kr} \quad (4)$$

<sup>1</sup> W dalszej części pracy jest ona nazywana również krócej „statystyką F”.

W przypadku klasyfikacji pojedynczej statystykę  $F$  wylicza się jako stosunek wariancji wielkości wejściowej do wariancji charakteryzującej niedokładność pomiarów. Zatem, im wartość  $\Delta F$  będzie większa, tym większa będzie siła wpływu czynnika wejściowego na analizowany parametr wyjściowy.

## 2.2. Etapy analizy statystycznej

Chcąc uzyskać wartość statystyki  $F_{obl}$  oraz różnicy  $\Delta F$ , a co za tym idzie odpowiedź na pytanie dotyczące istotności wpływu wybranych czynników wejściowych (struktury) silnika na zdefiniowane miary diagnostyczne należało postępować zgodnie z opracowanym schematem realizacji badań [Puzdrowska, 2021]. Zarejestrowany sygnał w pierwszym kroku poddano obróbce matematycznej (usunięcie zakłóceń z sieci pomiarowej metodą najmniejszej sumy kwadratów). Istotnym elementem podczas oceny własności dynamicznych termoelementu jest określenie odpowiedzi termopary na wymuszenie sinusoidalne temperatury gazu - przesunięcie fazowe oraz amplitudę zmian temperatury rejestrowanej przez termoparę w stosunku do wymuszanych, rzeczywistych zmian temperatury gazu [Puzdrowska, 2016 i 2018CE]. Z tak uzyskanego przebiegu rzeczywistej i pozbawionej zakłóceń szybkozmiennej temperatury spalin wyznaczono miary diagnostyczne. Dzięki zastosowaniu planu randomizowanego kompletnego wyodrębniono wielkości wejściowe nieistotne i wyeliminowano je z funkcji obiektu badań, dokonano także uzasadnienia merytorycznego. Ostatnim etapem jest zrealizowanie planu randomizowanego blokowego oraz analiza statystyczna dwuczynnikowa i wnioski merytoryczne do niej.

## 2.3. Miary diagnostyczne

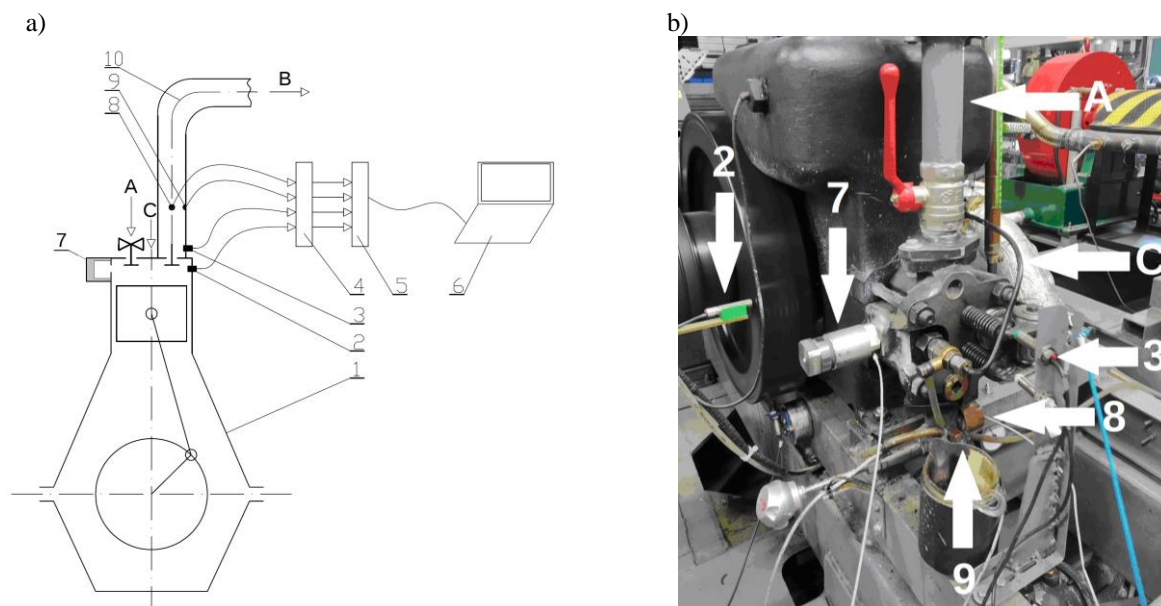
Wyniki badań laboratoryjnych dotyczyły przebiegów zmienności temperatury spalin dla pojedynczego cyklu pracy silnika. Poddano analizie 3 różne wzorce miar sygnału pomiarowego, wyznaczone na podstawie pomiarów i analizy sygnału quasiokresowego, jakim jest szybkozmienna temperatura spalin w kanale wylotowym tłokowego silnika okrętowego, wyznaczone z sygnału poddanego wcześniejszej obróbce matematycznej (rys. 2) [Korczewski i Puzdrowska, 2015; Marszałkowski i Puzdrowska, 2015; Puzdrowska, 2016; Roberts, 2004].

Średnią wartość międzyszczytową szybkozmiennej temperatury spalin wylotowych  $\Delta T_{sr}$  wyznaczono jako różnicę pomiędzy maksymalną a minimalną wartością temperatury dla poszczególnych cykli pracy silnika. Wartość entalpii jednostkowej spalin  $h_{sr}$  wyznaczono poprzez całkowanie przebiegu szybkozmiennej temperatury spalin w granicach określonych wartościami kąta obrotu wału korbowego silnika dla jednego cyklu pracy, przy znanej wartości ciepła właściwego spalin  $c_p$ , obliczanej z równań stechiometrycznych dla ich średniej temperatury. Wartość  $c_p$  wyznaczono na podstawie składu paliwa zasilającego i pomiarów współczynnika nadmiaru powietrza rejestrowanego dla każdego stanu pracy tłokowego silnika okrętowego. Znajomość szybkości wzrostu oraz spadku temperatury spalin wylotowych  $\Delta T/\Delta \tau \uparrow$  pozwoliła na określenie dynamiki przebiegu obserwowanego procesu cieplno-przepływowego. Jako, że analizowano sygnał rzeczywisty po korekcie amplitudowo - fazowej jest przebiegiem sinusoidalnym, wartości szybkości wzrostu i spadku temperatury spalin były takie same. Szybkość wzrostu (spadku) temperatury spalin wylotowych wyznaczono jako stosunek dwóch różnic: różnicy pomiędzy maksymalną a minimalną wartością temperatury spalin wylotowych w obrębie jednego cyklu pracy silnika w [K] oraz różnicy między czasem, w którym temperatura spalin wylotowych w obrębie jednego cyklu pracy silnika osiąga wartość maksymalną i minimalną [s]. Wymienione miary diagnostyczne zostały szerzej opisane w publikacji [Puzdrowska 2019].



### 3. Opis stanowiska laboratoryjnego i zastosowanej aparatury pomiarowej

Badania empiryczne przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym jednocylindrowego, czterosuwowego tłokowego silnika okrętowego Farymann Diesel typu D10 (rys. 2), znajdującym się w Laboratorium Zakładu Siłowni Okrętowych Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej. Podstawowe dane techniczne silnika to: moc nominalna 6,0 kW, prędkość obrotowa nominalna  $1500 \text{ min}^{-1}$ , moment obrotowy nominalny 38 N·m, średnica cylindra 90 mm, skok tłoka 120 mm, stopień kompresji 22:1, pojemność skokowa  $765 \text{ cm}^3$ . W tabeli 1 przedstawiono zestawienie mierzonych parametrów kontrolnych oraz urządzenia pomiarowe zastosowane podczas realizacji badań.



Rys. 2. a) Schemat ideowy stanowiska laboratoryjnego z zaznaczonymi miejscami montażu czujników pomiarowych: 1 - silnik Farymann Diesel typu D10, 2 - czujnik położenia GMP tłoka i prędkości obrotowej wału korbowego, 3 - czujnik otwarcia zaworu wylotowego, 4 - konwerter A/C, 5 - rejestrator, 6 - program analizujący, 7 - element konstrukcyjny powiększający pojemność komory spalania, 8 - czujnik ciśnienia spalin wylotowych, 9 - termopara chłodzona wodą, 10 - kanał wylotu spalin, A – powietrze dolotowe, B – spaliny wylotowe, C – paliwo zasilające; b) Widok stanowiska laboratoryjnego z zaznaczonymi czujnikami parametrów rejestrowanych podczas pomiarów: 2 - czujnik GMP i prędkości obrotowej, 3 – czujnik otwarcia zaworu wylotu spalin, 7 - element konstrukcyjny powiększający objętość komory spalania wraz z czujnikiem ciśnienia czynnika wewnątrz komory spalania, 8 – czujnik ciśnienia w kanale, 9 - termopara chłodzona wodą, A – powietrze dolotowe (kanał wraz z zaworem regulacyjnym), C – paliwo zasilające.

Tab. 1. Parametry kontrolne rejestrowane na stanowisku laboratoryjnym silnika Farymann Diesel typu D10

Lp.	Parametr	Urządzenie pomiarowe	Jednostka	Zakres pomiarowy
1.	Temperatura spalin wylotowych – $t_{sp}$	termopara typu K ze spoiną zgrzewaną do płaszczka, o średnicy zewnętrznej 0,5 mm, wykonanego z Inconelu	$^{\circ}\text{C}$	0-1000
2.	Ciśnienie spalin wylotowym – $p_{sp}$	optyczny czujnik ciśnienia firmy Optrand C12296	V	0-689475,73 Pa (0-100 psi), czułość $6,01 \cdot 10^{-8} \text{ V/Pa}$ (41,43 mV/psi)
3.	Prędkość obrotowa (położenie kątowe w $^{\circ}\text{OWK}$ ) wału korbowego silnika – n Górne martwe położenie - GMP	indukcyjny czujnik prędkości obrotowej i GMP	$\text{min}^{-1}$	0–3000

4.	Natężenie prądu obciążenia prądnicy (twornika) – $I_{tw}$	miernik natężenia prądu elektrycznego	A	0–15
5.	Napięcie na zaciskach twornika prądnicy – $U_{tw}$	miernik napięcia prądu elektrycznego	V	0–250
6.	Sygnal otwarcia zaworu wylotowego	transoptor szczelinowy z komparatorem LM393	V mm	0-5 10 (szczelina)

Do rejestracji szybkozmiennej temperatury i ciśnienia spalin wylotowych, a także sygnału górnego martwego położenia tłoka użyto wielofunkcyjnego modułu pomiarowo-rejestrującego typu DT-9805 firmy Data Translation, natomiast do zapisu rejestrowanych wartości w języku programisty zastosowano oprogramowanie Matlab. Podczas badań eksperymentalnych pomiary realizowano dla 3 punktów pracy według charakterystyki regulatorowej, ze względu na ograniczone możliwości układu regulacji obciążenia i sterowania dawką paliwa zasilającego badanego silnika. W trakcie badania utrzymywana była stała prędkość obrotowa wału korbowego w zakresie 1442-1444 obr/min, dla obciążeń silnika kolejno:  $P_{obc1}=432W$ ,  $P_{obc2}=768W$ ,  $P_{obc3}=1200W$ . Częstotliwość próbkowania wynosiła około 7000 Hz. Przedstawione wyniki badań są średnią z 90, kolejno po sobie następujących pomiarów zarejestrowanych w tych samych warunkach pracy silnika, zdeterminowanych jego obciążeniem, prędkością obrotową wału korbowego i parametrami otoczenia. W czasie badań w silniku spalane było paliwo żeglugowe typu MGO. Głównym celem prowadzonych badań empirycznych było ustalenie informacyjności diagnostycznej szybkozmiennej temperatury spalin wylotowych silnika tłokowego, należało zatem ustalić jej wrażliwość na zmiany parametrów jego struktury konstrukcyjnej. W związku z powyższym zmiennymi wejściowymi były parametry struktury wymienione poniżej.

Po pierwsze czynne pole przekroju przepływu kanału powietrza dolotowego  $A_{dol}$  zmieniało swoją wartość względem stanu referencyjnego, rozumianego jako pełne otwarcie zaworu regulacyjnego, co symulowało utratę drożności przegrody filtracyjnej. Zmieniało wartość czynnego pola przekroju przepływu kanału dolotowego w 3 zakresach (100% - 804 mm<sup>2</sup>, 75% - 603 mm<sup>2</sup>, 50% - 401 mm<sup>2</sup>) [Puzdrowska, 2020].

Jako drugi parametr wejściowy struktury konstrukcyjnej wybrano ciśnienie otwarcia wtryskiwacza  $p_{wtr}$  regulowane poprzez relaksację sprężyny we wtryskiwaczu. W badanym silniku zamontowany jest wtryskiwacz z podkładkami o grubości  $\delta_{wtr}$  równej 1,3+1 mm, co daje wartość ciśnienia otwarcia wtryskiwacza paliwa około 12 MPa (wartość dla stanu referencyjnego). Podczas badania dla stanu 2 we wtryskiwaczu zamontowano podkładki o grubości 1,3+0,5 mm, co powodowało obniżenie ciśnienia otwarcia wtryskiwacza do 10 MPa, co symulowało uszkodzenie układu wtrysku paliwa.

W trzecim kroku dokonano zmian parametru struktury jakim jest pojemność komory spalania, co miało swoje odzwierciedlenie w wartościach stopnia kompresji silnika  $\varepsilon$ . Wartość referencyjna dla badanego silnika to  $\varepsilon_{REF} = \varepsilon_1 = 22:1$ , natomiast wartość obniżona wyniosła  $\varepsilon_2 = 21:1$ , ze względu na ograniczenia konstrukcyjne silnika jednocyndrowego, który jest bardzo wrażliwy na nawet najmniejsze zmiany wartości parametrów struktury. Obniżenie stopnia kompresji zostało zrealizowane dzięki zastosowaniu dodatkowego elementu konstrukcyjnego, zwiększającego pojemność komory spalania o  $\Delta V_k = 0,125 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ , przy początkowej (referencyjnej) pojemności komory spalania  $V_{k1} = 3,787 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$  oraz pojemności skokowej  $V_s = 79,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ . Przed przystąpieniem do badań przeprowadzono eksperyment wstępny mający na celu ocenę wpływu obciążenia silnika  $P$  na szybkozmienną temperaturę spalin wylotowych ( $P$  traktowane jako parametr wejściowy).

#### 4. Wyniki analizy statystycznej

W analizie matematycznej i statystycznej obliczono wartości zdefiniowanych miar diagnostycznych ( $h_{sr}$ ,  $\Delta T_{sr}$ ,  $(\Delta T/\Delta \tau)_{sr}$ ) w obrębie jednego cyklu pracy silnika. Wyznaczono

wartości statystyki  $F_{obl}$  dla parametrów wejściowych, jakimi są zmienne parametry struktury ( $A_{dol}$ ,  $p_{wtr}$ ,  $\varepsilon$ ).

W celu wyznaczenia wartości statystyki  $F_{obl}$  postawiono następujące hipotezy zerowe  $H_{0i}$ :

$H_{01}$ : wartość analizowanego parametru struktury nie ma wpływu na wartość jednostkowej entalpii strumienia spalin uśrednioną w obrębie jednego cyklu pracy silnika ( $S_{II}^2 = S_I^2$ ).

$H_{02}$ : wartość analizowanego parametru struktury nie ma wpływu na wartość międzyszczytową temperatury strumienia spalin w obrębie jednego cyklu pracy silnika ( $S_{II}^2 = S_I^2$ ).

$H_{03}$ : wartość analizowanego parametru struktury nie ma wpływu na wartość szybkości wzrostu oraz spadku temperatury spalin w obrębie jednego cyklu pracy silnika ( $S_{II}^2 = S_I^2$ ).

Na podstawie danych liczbowych oraz przyjętego poziomu istotności  $\alpha=0,05$  oraz założenia prawostronnego obszaru krytycznego wyznaczono wartości wszystkich trzech miar diagnostycznych dla strumienia spalin wylotowych w obrębie jednego cyklu pracy silnika, dla każdego punktu pomiarowego ( $P_i$ ) oraz zmiennego parametru struktury, a także liczbę stopni swobody dla licznika i mianownika  $f_1$  i  $f_2$ . Następnie z tablic statystycznych [Korzyński, 2017] odczytano wartość krytyczną statystyki  $F_{kr}=F_{(\alpha; f_1; f_2)}$  oraz wyznaczono wartości  $F_{obl}$ , których wartości przedstawiono w tabeli 2 oraz na rys. 3a - c. Gdy spełniony jest warunek:  $F_{obl} > F_{kr}$ , należy odrzucić hipotezę zerową i przyjąć w dalszych badaniach diagnostycznych, że w rozpatrywanym zakresie zmienności obciążenia silnika oraz wartości analizowanego parametru struktury konstrukcyjnej silnika ma on (parametr struktury) istotny wpływ na wyznaczone w obrębie jednego cyklu pracy tłokowego silnika okrętowego miary diagnostyczne (dodatnie wartości  $\Delta F$  w tabeli 1 oznaczone kolorem niebieskim).

Tab. 2. Wartość statystyki  $F_{obl}$  oraz ( $\Delta F = F_{obl} - F_{kr}$ ) dla zmiennych wartości analizowanego parametru struktury:

a) czynnego pola przepływu powietrza dolotowego b) ciśnienia otwarcia wtryskiwacza c) stopnia kompresji

a)

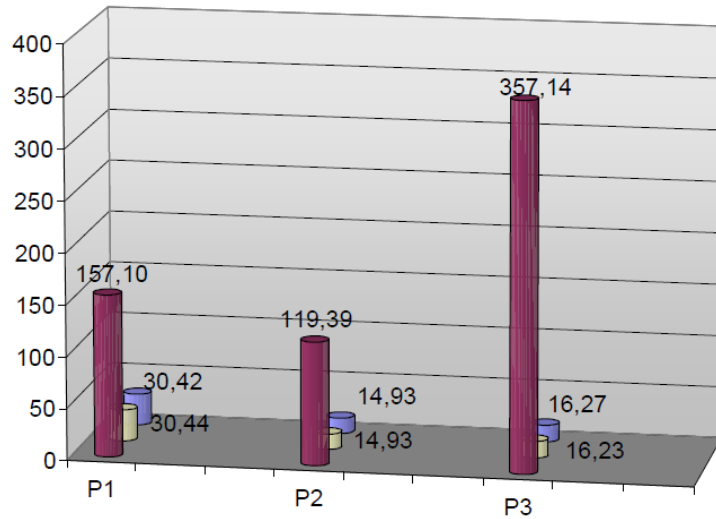
Punkt wg charakterystyki regulatorowej	$h_{sr}$ , kJ/kg	$\Delta T_{sr}$ , °C	$(\Delta T / \Delta \tau \uparrow)_{sr}$ , K/s
$P_1$ (432W; 5,1A; 72V)	157,10 (153,42)	30,44 (26,76)	30,42 (26,73)
$P_2$ (768W; 6,8A; 96V)	119,39 (115,70)	14,93 (11,24)	14,93 (11,25)
$P_3$ (1200W; 8,5A; 120V)	357,14 (353,45)	16,24 (12,55)	16,27 (12,59)

b)

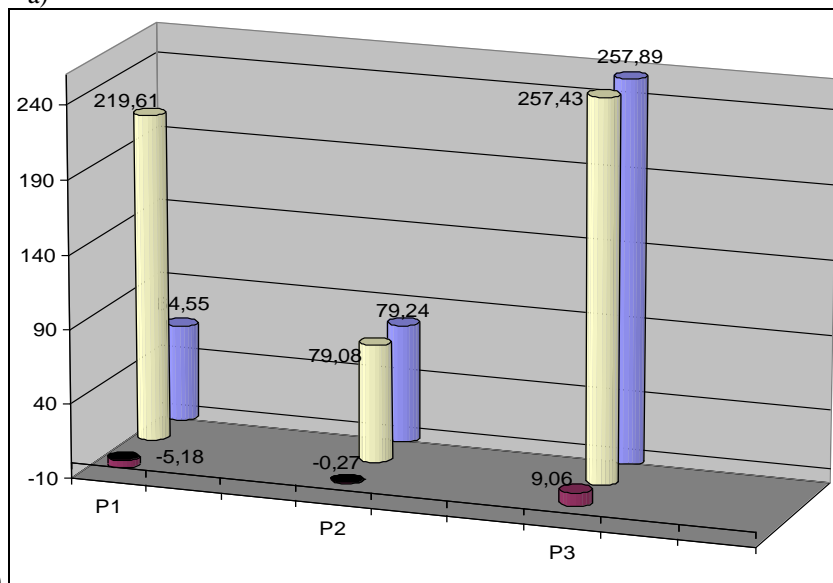
Punkt wg charakterystyki regulatorowej	$h_{sr}$ , kJ/kg	$\Delta T_{sr}$ , °C	$(\Delta T / \Delta \tau \uparrow)_{sr}$ , K/s
$P_1$ (432W; 5,1A; 72V)	0,81 (-5,18)	225,60 (219,61)	70,53 (64,55)
$P_2$ (768W; 6,8A; 96V)	5,72 (-0,27)	85,06 (79,08)	85,23 (79,24)
$P_3$ (1200W; 8,5A; 120V)	15,05 (9,06)	263,41 (257,43)	263,88 (257,89)

c)

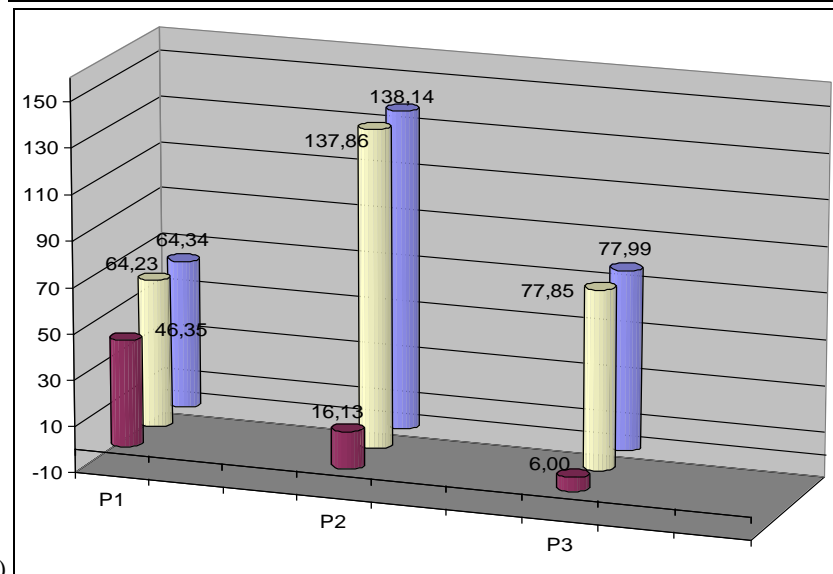
Punkt wg charakterystyki regulatorowej	$h_{sr}$ , kJ/kg	$\Delta T_{sr}$ , °C	$(\Delta T / \Delta \tau \uparrow)_{sr}$ , K/s
$P_1$ (432W; 5,1A; 72V)	52,34 (46,35)	70,22 (64,23)	70,32 (64,34)
$P_2$ (768W; 6,8A; 96V)	22,12 (16,13)	143,85 (137,86)	144,13 (138,14)
$P_3$ (1200W; 8,5A; 120V)	11,99 (6,00)	83,84 (77,85)	83,98 (77,99)



a)



b)

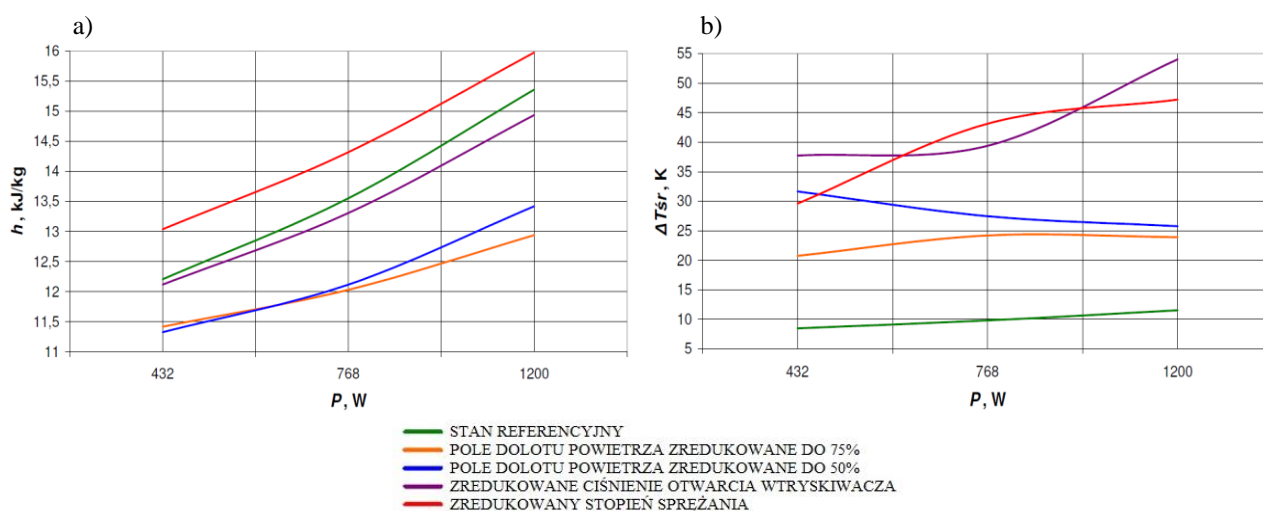


c)

■ hśr [kJ/kg] □ ΔTśr [°C] ▣ ΔT/Δt [K/s]

Rys. 3. Wartość różnicy statystyki  $\Delta F = F_{obl} - F_{kr}$  dla zmiennych wartości: czynnego pola przepływu powietrza dolotowego  $A_{dol}$  (a), ciśnienia otwarcia wtryskiwacza  $p_{wtr}$  (b), stopnia sprężania  $\varepsilon$  (c).

Dla oceny istotności wpływu parametrów struktury w tle zmiennego obciążenia łokowego silnika okrętowego wyznaczono charakterystyki obrazujące wyznaczone na podstawie przebiegów zmienności szybkozmiennnej temperatury spalin wylotowych miary diagnostyczne ( $h_{sr}$ ,  $\Delta T_{sr}$ ,  $\Delta T/\Delta \tau \uparrow$ ) jako funkcji obciążenia badanego silnika (rys. 4). Miarą rozwarstwienia tych charakterystyk są analizowane parametry struktury ( $A_{dol}$ ,  $p_{wtr}$ ,  $\epsilon$ ).



Rys. 4. Charakterystyki zmienności wyznaczonych miar diagnostycznych w obrębie jednego cyklu pracy jako funkcji obciążenia dla stanu referencyjnego oraz dla stanów częściowej zdadności:

- a) jednostkowej entalpii spalin wylotowych, b) średniej wartości międzyszczytowej temperatury spalin wylotowych, gdzie: stan referencyjny to  $A_{dol}=100\%$ ,  $p_{wtr}=12$  MPa,  $\epsilon=22:1$ , dolet powietrza w 75% i 50% względem referencyjnego, obniżone ciśnienie otwarcia wtryskiwacza do 10 MPa, obniżony stopień kompresji do 21:1

Na podstawie wyników analizy statystycznej (tab. 2) oraz sporządzonych charakterystyk zmienności wyznaczonych miar diagnostycznych w tle obciążenia silnika (rys. 4), w rozpatrywanym zakresie zmienności obciążenia oraz parametrów struktury silnika, wyciągnięto przedstawione poniżej wnioski merytoryczne.

1. Zmniejszenie czynnego pola przepływu powietrza dolotowego  $A_{dol}$  istotnie wpływa na wszystkie trzy wyznaczone miary diagnostyczne (tab. 2a). Najsilniejszy wpływ tego parametru struktury występuje w przypadku entalpii jednostkowej spalin (największe  $\Delta F$ ).
2. Obniżone ciśnienie otwarcia wtryskiwacza  $p_{wtr}$  wpłynęło istotnie na wartości: międzyszczytowej temperatury spalin oraz szybkości wzrostu (spadku) temperatury spalin, dla wszystkich analizowanych obciążeń silnika. Natomiast wpływ tego parametru struktury na jednostkową entalpię spalin wylotowych był istotny tylko w punkcie największego obciążenia silnika (tab. 2b). Jednak wpływ ciśnienia otwarcia wtryskiwacza na jednostkową entalpię spalin był znacznie mniejszy ( $\Delta F \approx 9$ ), niż w przypadku pozostałych dwóch miar, gdzie wartość  $\Delta F$  była rzędu kilkudziesięciu a nawet kilkuset.
3. Wpływ obniżonego stopnia kompresji  $\epsilon$  był istotny w przypadku wszystkich wyznaczonych miar diagnostycznych oraz dla całego rozpatrywanego zakresu zmienności obciążenia silnika (tab. 2c).

4. Dla jednostkowej entalpii spalin wylotowych  $h_{sr}$  obniżony stopień kompresji spowodował wzrost wartości tej miary diagnostycznej. Natomiast pozostałe zmiany parametrów struktury (zmniejszenie czynnego pola przepływu powietrza oraz obniżenie ciśnienia wtrysku paliwa) względem stanu referencyjnego, skutkowały spadkiem wartości tejże miary diagnostycznej ( $h_{sr}$ ) (rys. 4a).
5. W przypadku średniej wartości międzyszczytowej i szybkości wzrostu (spadku) temperatury spalin wszystkie wprowadzone zmiany wejściowych parametrów struktury spowodowały wzrost tychże miar diagnostycznych, co należy interpretować jako wzrost dynamiki przebiegu szybkozmiennej temperatury spalin (rys. 4b).

## 5. Uwagi i wnioski końcowe

Przebieg szybkozmiennej temperatury spalin w kanale wylotowym tłokowego silnika okrętowego może stanowić cenne źródło informacji diagnostycznej o stanie elementów konstrukcyjnych ograniczających komorę spalania, a także o aparaturze paliwowej i kanale powietrza dolotowego. Nie zawsze jednak możliwy jest pomiar tych parametrów w komorze spalania, chociażby ze względu na niską podatność kontrolną silnika seryjnego. Wówczas alternatywą diagnostyczną jest pomiar temperatury w kanale spalin wylotowych, przy odpowiednim uwzględnieniu zjawisk tam zachodzących, które mają wpływ na wartości wyznaczanych i analizowanych parametrów diagnostycznych. O ile pomiary ciśnienia w kanale spalin wylotowych są również nie zawsze możliwe, o tyle pomiary statycznej temperatury spalin wylotowych realizowane są standardowo. Z tego względu, przy zastosowaniu podczas badań silnika odpowiednio „szybkiej” termopary, w miejsce standardowej, możliwe jest uzyskanie znacznie dogłębszej informacji diagnostycznej. Możliwe jest opracowanie metodyki diagnozowania opartej na szybkozmiennej temperaturze.

W kolejnym etapie planuje się przeprowadzić analizę dwuczynnikową zgodnie z planem randomizowanym blokowym. Pozwoli ona na ocenę istotności wpływu dwóch wielkości wejściowych, w analizowanym przypadku jest to ocena wpływu parametrów struktury w tle zmiennego obciążenia. Ostatnim krokiem analizy statystycznej wyników pomiarów przeprowadzonych z zastosowaniem planów randomizowanych kompletnego i blokowego będzie uzasadnienie merytoryczne.

## Literatura

### Publikacje

- [1] Brown C., Kee, R.J., Irwin, G.W. et al. (2008), Identification applied to dual sensor transient temperature measurement. UKACC Int Control Conference. Manchester.
- [2] Debnath, B.K., Sahoo, N., Saha, U. K. (2013), Thermodynamic analysis of variable compression ratio diesel engine running with palm oil methyl ester, Energy Conversion and Management vol. 65. pages 147-154.
- [3] Hötger M., Mayr B., Puschmann H. (1992), Integrale Lichtleit-Meßtechnik: Ein neuer Weg zur Untersuchung des Verbrennungsprozesses in Dieselmotoren. MTZ.
- [4] Jaremkiewicz M. (2011), Odwrotne zagadnienia wymiany ciepła, występujące w pomiarach nieustalanej temperatury płynów. Rozprawa doktorska. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Kraków.
- [5] Jaremkiewicz M., Taler, J., (2016), Inverse determination of transient fluid temperature in pipelines. Journal of Power Technologies, 96(6). p. 385-389.
- [6] Korczewski Z., Puzdrowska P. (2015), Analytical method of determining dynamic properties of thermocouples used in measurements of quick – changing temperatures of exhaust gases in marine diesel engines. Poznań. Combustion Engines, nr 162 (3) (2015), s. 300-306.
- [7] Korczewski Z., Zacharewicz M. (2012), Alternative diagnostic method applied on marine diesel engines having limited monitoring susceptibility. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 34 (8), p. 937-946.
- [8] Korczewski, Z. (2017), Diagnostyka eksploatacyjna okrętowych silników spalinowych – tłokowych i turbinowych. Wybrane zagadnienia. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk.

- [9] Korzyński, M. (2017), *Metodyka eksperymentu. Planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych*. Wydawnictwo WNT. Warszawa.
- [10] Kowalczyk M. (2000), *Wybrane zagadnienia wymiany ciepła w silnikach wysokoprężnych - wymiana przez promieniowanie*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- [11] Kudrewicz J. (1976), *Analiza funkcjonalna dla automatyków i elektroników*. PWN. Warszawa.
- [12] Marszałkowski K., Puzdrowska P. (2015), A laboratory stand for the analysis of dynamic properties of thermocouples. *Gdańsk Journal of Polish CIMEEAC – vol. 10, nr 1 (2015), s. 111 – 120.*
- [13] Mazur M. (1970), *Jakościowa teoria informacji*. WNT. Warszawa
- [14] Mijas, Ł., Reiter, E., Kukielka, K. (2013), *Wykorzystanie systemu ANSYS Workbench do analizy statycznej korbowodów*, Instytut Naukowo-Wydawniczy "SPATIUM". *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, R. 14, nr 10 Str. 315--317, Radom.
- [15] Morey F., Seers P. (2010), Comparison of cycle-by-cycle variation of measured exhaust - gas temperature and in - cylinder pressure measurements. *Applied Thermal Engineering*, nr 30, str. 487 - 491.
- [16] Olczyk A. (2007), *Koncepcja pomiaru szybkozmiennej temperatury gazu z uwzględnieniem dynamicznej składowej temperatury*. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 53 Bis/9, s. 576-579.
- [17] Pfriem H. (1936), *Zur Messung veränderlicher Temperaturen von Gasen Und Flüssigkeiten*, *Gen. Ingen.*, vol. 7, no. 2, pp. 85–92.
- [18] Polanowski S. (2007), *Studium metod analizy wykresów indykatorowych w aspekcie diagnostyki silników okrętowych*. *Zeszyty Naukowe AMW, Nr 69 A*, Gdynia.
- [19] Polański Z. (1984), *Planowanie doświadczeń w technice*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe. Warszawa.
- [20] Puzdrowska P. (2016), Determining the time constant using two methods and defining the thermocouple response to sine excitation of gas temperature. *Gdańsk Journal of Polish CIMEEAC – vol. 11, nr 1, s. 157 – 167.*
- [21] Puzdrowska P. (2018 (2)), Signal filtering method of the fast-varying diesel exhaust gas temperature. *Combustion Engines*, nr. 175(4), s.48-52.
- [22] Puzdrowska, P. (2019), Statystyka F rozkładu Fishera-Snedecora jako narzędzie do oceny istotności wpływu mocy silnika o ZS na wybrane miary diagnostyczne. *Journal of Polish CIMAC. -Vol. 14, nr. 1/18, s. 177-186.*
- [23] Puzdrowska, P. (2020), Evaluation of the significance of the effect of the active cross-sectional area of the inlet air channel on the specific enthalpy of the exhaust gas of a diesel engine using statistics F of the Fisher-Snedecor distribution. *Combustion Engines -Vol. 182, issue 3/2020, s.10-15.*
- [24] Puzdrowska, P. (2021), Application of the F-statistic of the Fisher-Snedecor distribution to analyze the significance of the effect of changes in the compression ratio of a diesel engine on the value of the specific enthalpy of the exhaust gas flow. *Combustion Engines, 186, 80-88.*
- [25] Roberts S. J., Stone R. (2004), *Instantaneous Exhaust Temperature Measurement Using Thermocouple Compensation Techniques*. SAE Technical Papers.
- [26] Rutkowski S. (1976), *Wykorzystanie dynamicznych pomiarów temperatur spalin wylotowych w diagnostyce okrętowych silników spalinowych*, Kopia maszynopisu streszczenia artykułu z 1976 roku.
- [27] Shannon C. E. (1945), *A mathematical theory of cryptography*. A classified memorandum for Bell Telephone Labs. USA.
- [28] Tagawa M., Ohta Y. (1997), Two - Thermocouple Probe for Fluctuating Temperature Measurement in Combustion - Rational Estimation of Mean and Fluctuating Time Constants. *Combustion and Flame*, nr 109, str. 540-560.
- [29] Wisłocki K. (2004), *Studium wykorzystania badań optycznych do analizy procesów wtrysku i spalania w silnikach o zapłonie samoczynnym*, *Rozprawa habilitacyjna, Rozprawy nr 387*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- [30] Wiśniewski S. (2005), *Termodynamika techniczna*, Wydawnictwo Naukowo - Techniczne, Warszawa.
- [31] Witkowski K. (2011), *Możliwość komputerowego wspomaganie diagnozowania okrętowych silników tłokowych*. *Studia i materiały Polskiego Stowarzyszenia Zarządzania Wiedzą*, nr 48, s.136-147.
- [32] Witkowski K. (2017), The Increase of Operational Safety of Ships by Improving Diagnostic Methods for Marine Diesel Engine, *Transnav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 11, no 2.
- [33] Włodarski J. K. (1995), *Okrętowe silniki spalinowe. Obciążenia eksploatacyjne*, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni, Gdynia.
- [34] Woś, P., Jaworski, A., Kuszewski, H., Lejda, K., Ustrzycki, A. (2016), Technical and operating problems yielded from setting up the optimum value of geometric compression ratio in piston engines, *Combustion Engines*, Vol. 164, 1/2016, s. 3-14.
- [35] Zacharewicz M. (2010), *Metoda diagnozowania przestrzeni roboczych silnika okrętowego na podstawie parametrów gazodynamicznych w kanale zasilającym turbosprężarkę*. *Rozprawa doktorska. AMW, Gdynia.*

## **Regulacje prawne i normy**

[36]International Association of Classification Societies (2016), Requirements Concerning Machinery Installations. M35: Alarms, remote indications and safeguards for main reciprocating I.C. engines installed in unattended machinery spaces.

[37]International Association of Classification Societies (2016), Requirements Concerning Machinery Installations. M36: Alarms and safeguards for auxiliary reciprocating I.C. engines driving generators in unattended machinery spaces.

[38]International Association of Classification Societies (2016), Requirements Concerning Machinery Installations. M73: Turbochargers.

[39]Polski Rejestr Statków (2016), Przepisy. Publikacja nr 5/P. Wymagania dla turbosprężarek. Rozdział 2. Wymagana dokumentacja. Gdańsk.

[40]Polski Rejestr Statków (2019), Przepisy. Publikacja nr 28/P. Próby silników spalinowych. Rozdział 1. Próba typu silników spalinowych. Rozdział 2. Próby zdawczo – odbiorcze silników spalinowych (szczególnie podrozdział 2.2.2). Gdańsk.