

## POSZUKIWANIE RELACJI DIAGNOSTYCZNYCH POMIĘDZY USZKODZENIAMI W KANAŁE SPALIN WYLOTOWYCH SILNIKA O ZS A SZYBKOZMIENNĄ TEMPERATURĄ SPALIN

Patrycja Puzdrowska

Politechnika Gdańska  
Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa  
Katedra Siłowni Morskich i Lądowych  
80-233 Gdańsk ul. G. Narutowicza 11/12, tel.: +48 58 347 16 14  
e-mail: patpuzdr@pg.edu.pl

### Streszczenie

Temperatura spalin wylotowych tłokowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym, mierzona w charakterystycznych przekrojach kontrolnych jego układu cieplno-przepływowego, może stanowić cenne źródło informacji diagnostycznej o stanie technicznym elementów ograniczających wydzielone w ten sposób przestrzenie robocze, wraz z układem turbodoładowania, ale także jego układu zasilania paliwem i wymiany czynnika roboczego. W standardowych układach pomiarowych silników okrętowych wyposażonych w impulsowy układ turbodoładowania temperaturę spalin mierzy się na wylocie z poszczególnych cylindrów oraz przed i za turbiną turbosprężarki, stosując do tego celu tradycyjne termopary o znacznej inercyjności pomiarowej (stałe czasowe rzędu dziesiątych części sekundy i więcej). Oznacza to, że do dalszych analiz diagnostycznych przyjmuje się wartość uśrednioną okresowo zmiennego przebiegu temperatury strumienia spalin wylotowych opuszczających poszczególne cylindry silnika, strumienia spalin w kanale zbiorczym zasilającym turbinę i strumienia spalin w kanale wylotowym turbiny.

W niniejszym artykule zaproponowano nowe podejście do zagadnienia informacyjności diagnostycznej temperatury spalin wylotowych silnika o ZS, rozszerzając jej obserwacje o dynamikę zmian w zakresie czasu trwania jednego cyklu roboczego. Celem badań realizowanych na stanowisku laboratoryjnym silnika Farymann Diesel typu D10 było określenie relacji diagnostycznych pomiędzy stanem drożności kanału spalin wylotowych i wytypowanymi wzorcami miar szybkozmiennego sygnału temperatury spalin wylotowych. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wyznaczono następujące cechy dynamiczne zarejestrowanego sygnału: maksymalną amplitudę chwilowych wartości temperatury spalin wylotowych (wartość międzyszczytowa), szybkość jej wzrostu i spadku oraz jednostkową entalpię spalin wylotowych w obrębie jednego cyklu pracy silnika.

Analiza porównawcza danych liczbowych charakteryzujących zarejestrowane szybkozmiennie przebiegi temperatury spalin wylotowych jednoznacznie wskazuje oczekiwane konsekwencje termodynamiczne częściowej utraty drożności kanału wylotu spalin silnika badawczego.

Przewiduje się dalsze rozwinięcie programu badań eksperymentalnych, w celu wyznaczenia macierzy diagnostycznej wspomagającej wnioskowanie diagnostyczne o stanie technicznym silnika o ZS, na podstawie pomiarów i analizy szybkozmienną temperatury spalin wylotowych.

Słowa kluczowe: silnik o ZS, temperatura spalin wylotowych, badania diagnostyczne.

### 1. Wstęp

Szybkozmienna temperatura spalin wylotowych silnika pozwala na uzyskanie informacji diagnostycznych dotyczących stanu technicznego elementów konstrukcyjnych ograniczających jego przestrzenie robocze cylindra, w tym również kanału spalin wylotowych [1, 2, 3]. Chcąc opracować metodę diagnozowania opartą na tym parametrze należy pogodzić takie wymagania, jak: wysoka dokładność pomiarów, ich ekonomiczność oraz technologiczność. Należy pamiętać także o minimalizowaniu wpływu czynników zewnętrznych na dokładność pomiarów. Słuszne wydaje się zatem zastosowanie metody pomiarów temperatur szybkozmiennych za pomocą

termopary chłodzonej wodą [5, 6, 17].<sup>1</sup> Istotne w procesie opracowywania metodyki wnioskowania parametrycznego na podstawie rejestrowanego sygnału szybkozmiennej temperatury spalin wylotowych jest także znalezienie odpowiednich relacji diagnostycznych, pozwalających określić wpływ oddziaływania uszkodzenia w kanale spalin wylotowych silnika o ZS na tenże parametr.

## 2. Warunki badania laboratoryjnego

Badania empiryczne przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym jednocylindrowego, czterosuwowego silnika o ZS Farymann Diesel typu D10 (rys. 2). Podstawowe dane techniczne silnika są następujące: moc nominalna 5,9 kW, prędkość obrotowa nominalna 1500 min<sup>-1</sup>, moment obrotowy nominalny 38 N·m, średnica cylindra 90 mm, skok tłoka 120 mm.

Celem badań było zarejestrowanie szybkozmiennej temperatury spalin w wytypowanych przekrojach kontrolnych<sup>2</sup> kanału spalin wylotowych silnika, a na ich podstawie wyznaczenie parametrów diagnostycznych dla dwóch różnych stanów technicznych: referencyjnego oraz częściowej utraty drożności kanału spalin wylotowych.

W trakcie badań rejestrowano następujące parametry kontrolne i wskaźniki pracy silnika (scharakteryzowane w tabeli 1):

- temperaturę spalin wylotowych przed przepustnicą, przy zastosowaniu termopary typu K chłodzonej dodatkowo płaszczem wodnym;
- ciśnienie spalin w kanale wylotowym przed przepustnicą,
- ciśnienie spalin w kanale wylotowym za przepustnicą,
- ciśnienie spalin w komorze spalania,
- sygnał górnego martwego położenia tłoka,
- natężenie prądu obciążenia prądnicy (twornika),
- napięcie na zaciskach twornika prądnicy,
- sygnał otwarcia zaworu wylotowego spalin.

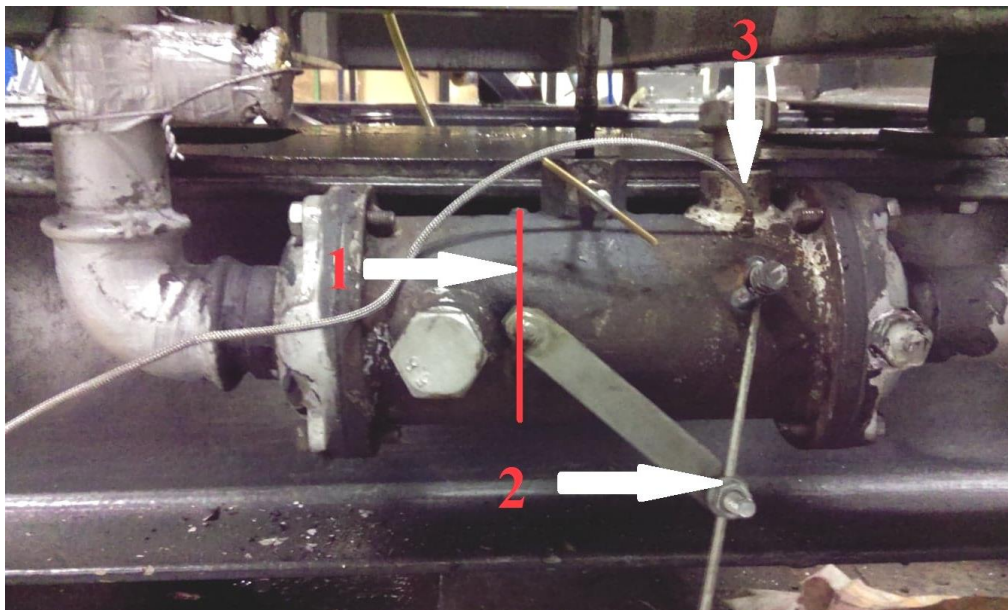
Do rejestracji pomiarów szybkozmiennych temperatur i ciśnień spalin wylotowych, a także sygnału górnego martwego położenia tłoka użyto wielofunkcyjnego modułu pomiarowo-rejestrującego typu DT-9805 firmy Data Translation, natomiast do zapisu i obróbki matematycznej rejestrowanych wartości temperatury szybkozmiennej spalin wylotowych zastosowano oprogramowanie Matlab oraz Microsoft Excel. W trakcie badania utrzymywana była stała prędkość obrotowa wału korbowego silnika 1445 min<sup>-1</sup> oraz stałe obciążenie silnika wynoszące 2660 W. Częstotliwość próbkowania wynosiła 7000 Hz.

Jak wcześniej wspomniano badanie przeprowadzono dla dwóch różnych stanów technicznych kanału spalin wylotowych silnika: określanych jako stan 1 (referencyjny) i stan 2, który zadawano zmieniając czynne pole przekroju przepływu spalin przepustnicą zamontowaną w tym kanale – rys. 1. W ten sposób symulowano zmniejszenie drożności kanału spalin wylotowych, wskutek na przykład jego zanieczyszczenia, co jest dość często występującym stanem niezdatności eksploatacyjnej każdego silnika spalinowego [7]. Podczas badania silnika w stanie 2 przepustnica była przymknięta w 90%.

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 destylacyjne ORLEN ECODIESEL.

<sup>1</sup> W wypadku braku chłodzenia termopary rejestrowany sygnał jest zakłócony, co wynika z nagrzewania się jej płaszczka od kanału spalinowego i otaczającego ją gazu, co zostało omówione w publikacji [15].

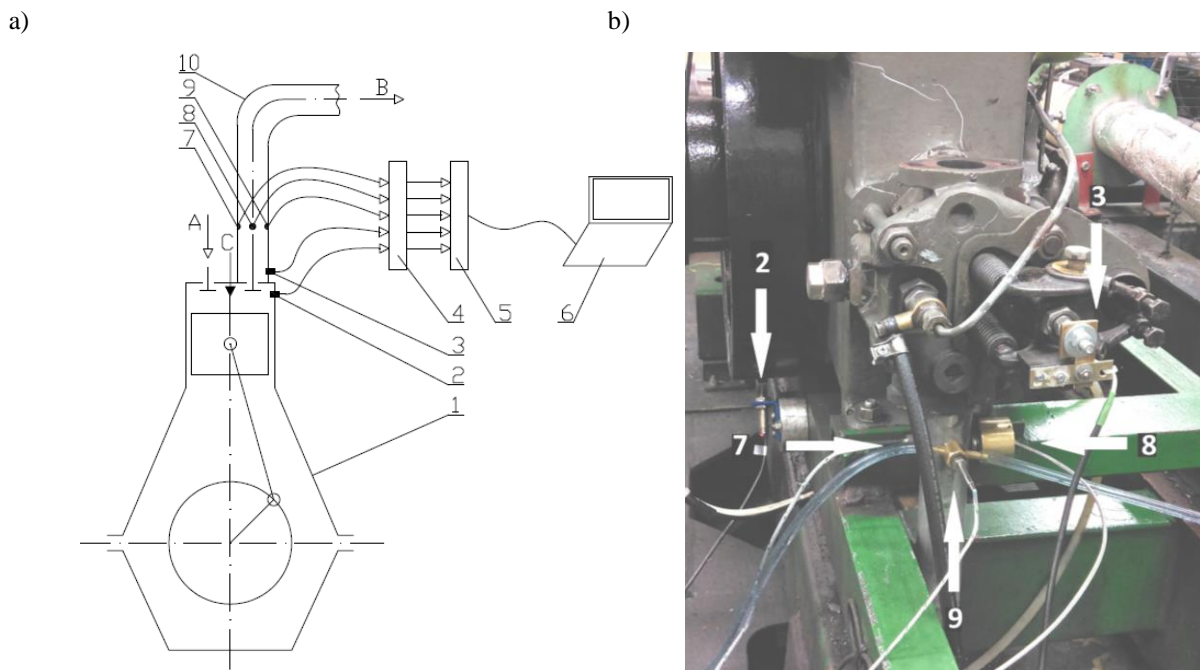
<sup>2</sup> Szybkozmienne: temperaturę i ciśnienie spalin rejestrowano w prostoliniowym kanale spalin wylotowych, w tej samej odległości od zaworu wylotowego cylindra tak, aby sygnały były porównywalne oraz aby uniknąć zakłóceń wynikających ze zmian kształtu rurociągu, a co za tym idzie z interferencji i odbicia fal ciśnienia w kanale.



Rys. 1. Widok odcinka kanału wylotu spalin z przepustnicą regulacyjną; 1 – miejsce montażu przepustnicy spalin wylotowych, 2 – mechanizm regulacyjny przepustnicy, 3 – miejsce montażu czujnika ciśnienia spalin za przepustnicą

Tab. 1 Parametry rejestrowane na stanowisku laboratoryjnym jednocylindrowego silnika o ZS Farymann Diesel typu D10

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



Rys 2. a) Schemat stanowiska laboratoryjnego z zaznaczonymi miejscami montażu czujników: 1 - silnik Farymann Diesel typu D10, 2 - czujnik GMP i prędkości obrotowej, 3 - czujnik otwarcia zaworu wylotowego, 4 - konwerter A/C, 5 - rejestrator, 6 - program analizujący, 7 - termopara w osłonie ceramicznej, 8 - czujnik ciśnienia, 9 - termopara chłodzona wodą, 10 - kanał wylotu spalin, A – powietrze dolotowe, B – spaliny wylotowe, C – paliwo zasilające  
 b) Widok stanowiska laboratoryjnego z zaznaczonymi czujnikami rejestrowanych podczas pomiarów: 2 - czujnik GMP i prędkości obrotowej, 7 - termopara w osłonie ceramicznej, 9 - termopara chłodzona wodą, 3 – czujnik otwarcia zaworu wylotu spalin, 8 – czujnik ciśnienia w kanale

Chcąc poddać obróbce matematycznej oraz analizie statystycznej uzyskane wyniki badań diagnostycznych silnika należy zdecydować się na porównanie jednakowych grup danych. Za najbardziej miarodajną i porównywalną „porcję” danych, uzyskanych w czasie rejestracji obserwowanych wielkości szybkozmiennych, uznano wyniki w obrębie jednego cyklu pracy silnika (od 0 do 720°OWK). Aby dopuścić możliwość takiego podejścia należy założyć, że uzyskany sygnał szybkozmiennych temperatury spalin jest sygnałem okresowym. Przebiegi czasowe analizowane w niniejszym opracowaniu spełniają warunki, pozwalające na uznanie ich za quasiokresowe, co również jest dopuszczalne [8, 10, 11]. Przebieg quasiokresowy jest zbliżony do rzeczywistej odpowiedzi termopary na wymuszenie sinusoidalne temperatury spalin, jednak uwzględnia przesunięcie fazowe oraz amplitudę zmian temperatury rejestrowanej przez termoparę w stosunku do wymuszanych, rzeczywistych zmian temperatury spalin. Obarczony jest także zakłóceniami pochodzącymi z toru pomiarowego, jednak podobnie jak przebieg okresowy cechuje go okresowa zależność od czasu (a także od wartości kąta obrotu wału korbowego,). Rejestrowany sygnał temperatury spalin wylotowych silnika cechuje okresowa zależność od czasu. Jej wartości powtarzają się w stałych odstępach, trwających przez czas zwany okresem, czyli:

$$x(\tau + T) = x(\tau) \quad (1)$$

Warunkiem koniecznym jest, aby okresem (T) była dowolna niezerowa liczba wymierna, co również zostało spełnione w przypadku analizowanych sygnałów szybkozmiennych temperatury spalin wylotowych [13, 15, 16].

### 3. Parametry diagnostyczne

Wyniki badań laboratoryjnych przedstawione w niniejszym rozdziale dotyczą przebiegów zmienności temperatury spalin dla pojedynczego cyklu pracy silnika. Poddano analizie 4 różne wzorce miar sygnału pomiarowego, wyznaczone na podstawie pomiarów i analizy sygnału quasiokresowego, jakim jest szybkozmienna temperatura spalin w kanale wylotowym silnika o ZS [9, 12, 14].

Dynamiczne pomiary temperatury spalin w wytypowanych przekrojach kontrolnych kanału wylotu spalin z silnika umożliwiają wyznaczenie:

- średniej wartości międzyszczytowej szybkozmiennnej temperatury spalin (różnica między maksimum i minimum dla sygnału, w obrębie jednego cyklu pracy silnika);
- jednostkowej entalpii kolejnych impulsów temperatury spalin opuszczających cylinder;
- szybkości (intensywności) wzrostu oraz spadku wartości szybkozmiennnej temperatury spalin dla pojedynczych cykli pracy silnika.

Na podstawie przebiegu szybkozmiennnej temperatury spalin wylotowych wyznaczono wymienione wzorce miar sygnału pomiarowego, które stanowią adekwatne parametry diagnostyczne dla badanych stanów niezdatności kanału spalin wylotowych. Wyniki ich analizy przedstawiono w kolejnych podpunktach niniejszego opracowania.

#### 3.1. Średnia wartość międzyszczytowa temperatury szybkozmiennnej

Średnią wartość międzyszczytową szybkozmiennnej temperatury spalin wylotowych wyznaczono jako różnicę pomiędzy maksymalną a minimalną wartością temperatury dla poszczególnych cykli pracy silnika (rysunek 3). Wartość tej miary diagnostycznej określono zgodnie z zależnością:

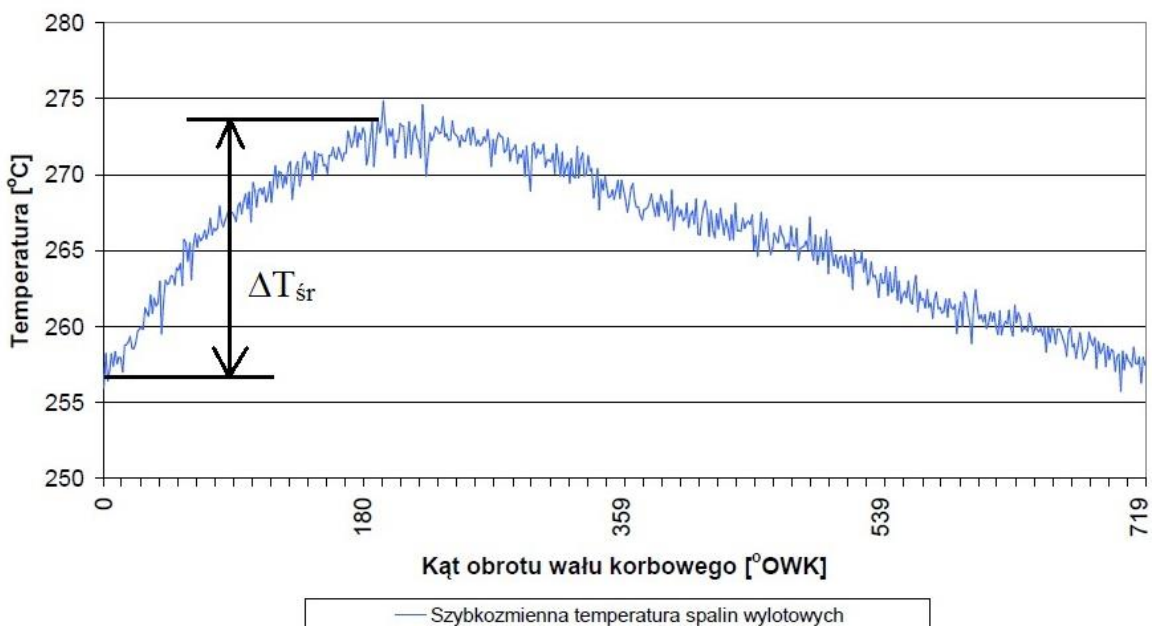
$$\Delta T_{\text{sr}} = t_{\text{max}} - t_{\text{min}} \quad [\text{K}] \quad (2)$$

gdzie:

$\Delta T_{\text{sr}}$  – średnia wartość międzyszczytowa [K],

$t_{\text{max}}$  – maksymalna temperatura spalin w obrębie jednego cyklu pracy silnika [°C],

$t_{\text{min}}$  – minimalna temperatura spalin w obrębie jednego cyklu pracy silnika [°C].



Rys. 3. Przebieg zmienności temperatury spalin wylotowych dla jednego cyklu pracy silnika oraz interpretacja graficzna wartości międzyszczytowej temperatury

### 3.2. Entalpia jednostkowa spalin wylotowych

Badanie przebiegu zmienności temperatury i ciśnienia spalin opuszczających cylinder silnika o ZS w zakresie trwania jednego cyklu pracy daje możliwość bezpośredniej jakościowej i ilościowej oceny entalpii jednostkowej spalin. Wartość tego parametru obliczeniowego 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, obliczanej z równań stechiometrycznych dla ich średniej temperatury:

$$h = \int_0^{720} c_{p(sp)} \cdot t_{sp} d\alpha_{OWK} \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (3)$$

gdzie:

$h$  – entalpia jednostkowa spalin [J/kg],

$c_{p(sp)}$  – średnie ciepło właściwe spalin [kJ/kg·deg],

$t_{sp}$  – temperatura spalin rejestrowana w obrębie jednego cyklu pracy silnika [°C],

$\alpha_{OWK}$  – wartość kąta obrotu wału korbowego silnika [°OWK].

Wartość średniego ciepła właściwego spalin stechiometrycznych wyznaczono na podstawie składu paliwa zasilającego (udziałów masowych węgla i wodoru) i pomiarów współczynnika nadmiaru powietrza rejestrowanego dla każdego stanu pracy silnika o ZS.

### 3.3. Szybkość wzrostu (spadku) temperatury spalin wylotowych

Znajomość szybkości wzrostu oraz spadku temperatury spalin wylotowych pozwala na określenie dynamiki przebiegu obserwowanego procesu ciepło-przepływowego. Rysunek 4 przedstawia interpretację graficzną metody określania tego parametru diagnostycznego dla jednego cyklu pracy silnika, na podstawie sygnału szybkozmiennej temperatury spalin.

Szybkość wzrostu (spadku) temperatury spalin wylotowych wyznaczono zgodnie z zależnością:

$$\frac{\Delta T}{\Delta \tau} = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{\tau(t_{\max}) - \tau(t_{\min})} \left[ \frac{K}{s} \right] \quad (4)$$

gdzie:

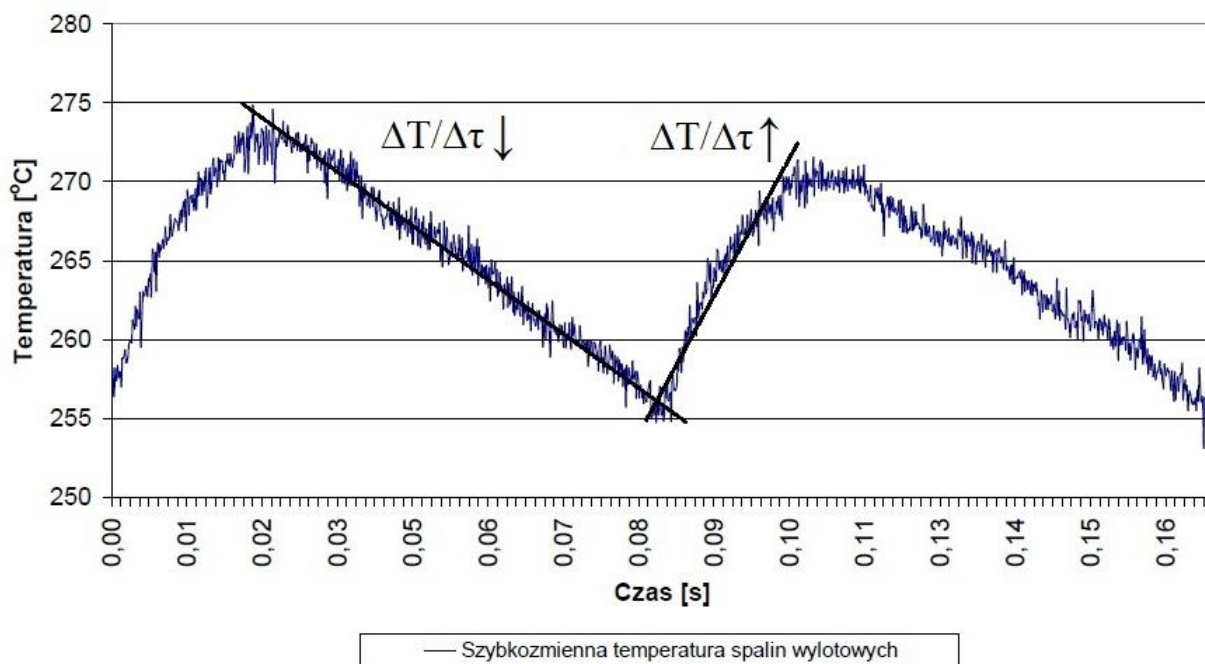
$\Delta T/\Delta \tau$  – szybkość wzrostu (spadku) temperatury spalin wylotowych [K/s],

$t_{\max}$  – maksymalna wartość temperatury spalin wylotowych w obrębie jednego cyklu pracy silnika [°C],

$t_{\min}$  – minimalna wartość temperatury spalin wylotowych w obrębie jednego cyklu pracy silnika [°C],

$\tau(t_{\max})$  – czas, w którym temperatura spalin wylotowych w obrębie jednego cyklu pracy silnika osiąga wartość maksymalną [s],

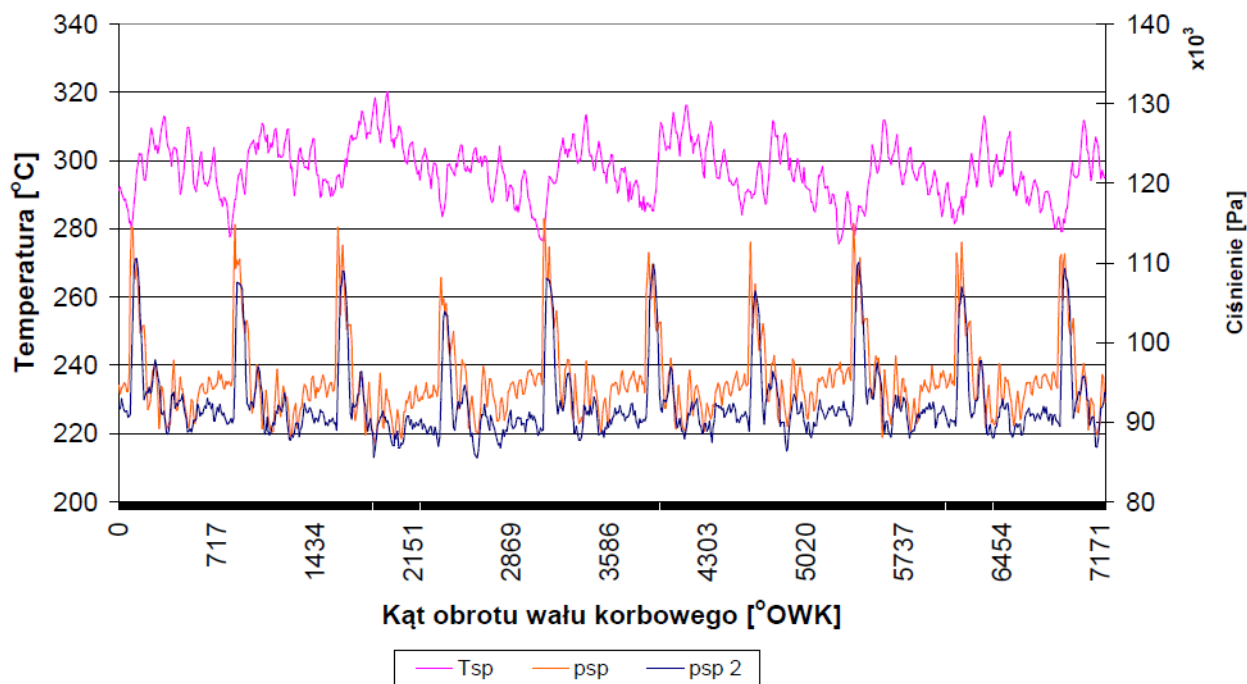
$\tau(t_{\min})$  – czas, w którym temperatura spalin wylotowych w obrębie jednego cyklu pracy silnika osiąga wartość minimalną [s].



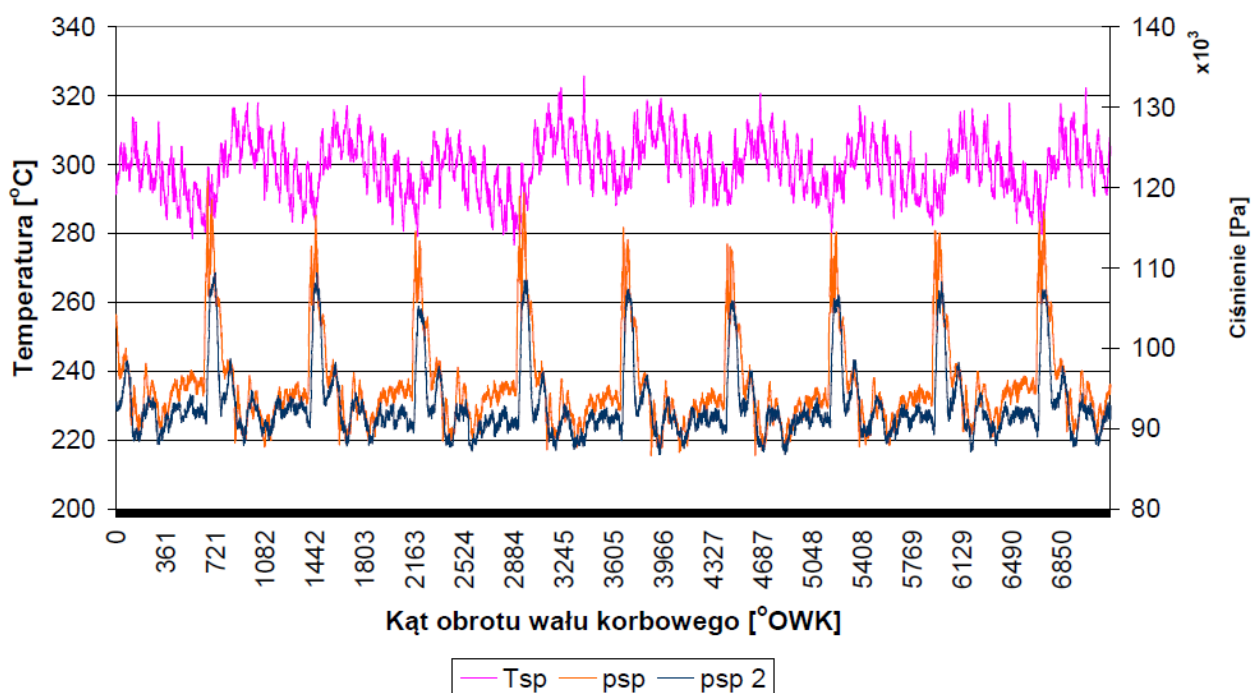
Rys. 4. Przebieg zmienności temperatury spalin wylotowych uzyskany dla pojedynczych cykli pracy silnika oraz interpretacja graficzna sposobu wyznaczania szybkości wzrostu i spadku temperatury

#### 4. Uzyskane wyniki badań i obliczeń

Dla dwóch badań eksperymentalnych przeprowadzonych w skrajnie różnych stanach technicznych kanału spalin wylotowych silnika o ZS wyznaczono opisane powyżej miary (parametry) diagnostyczne. Na rysunkach 5 oraz 6 przedstawiono przebiegi czasowe szybkozmiennnej temperatury spalin wylotowych uzyskane z dziesięciu kolejnych cykli pracy silnika, dla dwóch rozpatrywanych stanów technicznych kanału spalin wylotowych: „1” - referencyjnego, „2” - częściowej utraty drożności kanału spalin wylotowych. Zaprezentowane sygnały szybkozmiennnej temperatury zostały poddane obróbce matematycznej w celu usunięcia zakłóceń pochodzących z sieci pomiarowej. Uzyskane w czasie badania silnika laboratoryjnego wartości zmierzonej temperatury spalin zostały poddane filtrowaniu metodą najmniejszej sumy kwadratów w środowisku oprogramowania Microsoft Excel.



Rys. 5. Przebiegi czasowe szybkozmiennej temperatury i ciśnienia spalin wylotowych uzyskany z pięciu kolejnych cykli pracy silnika dla stanu „1” - przy całkowicie otwartym kanale wylotowym spalin ( $T_{sp}$  - temperatura spalin rejestrowana przed przepustnicą,  $p_{sp}$  - ciśnienie spalin rejestrowane przed przepustnicą,  $p_{sp2}$  - ciśnienie spalin rejestrowane za przepustnicą)



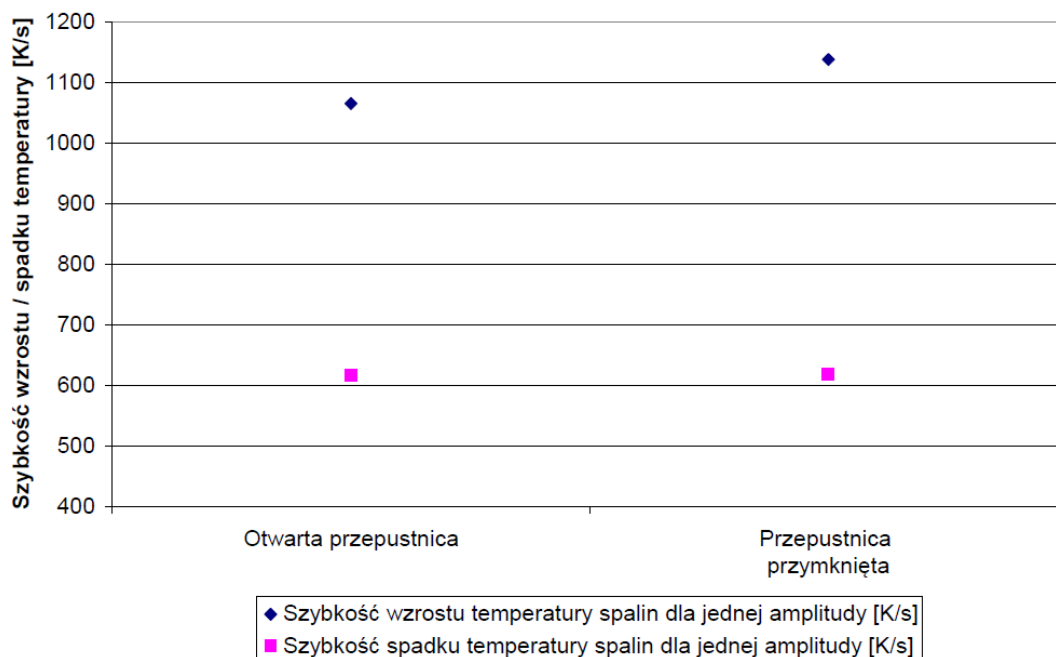
Rys. 6. Przebiegi czasowe szybkozmiennej temperatury i ciśnienia spalin wylotowych uzyskany z pięciu kolejnych cykli pracy silnika dla stanu 2 - przy częściowo zamkniętym kanale wylotowym spalin (jak na rys. 1) ( $T_{sp}$  - temperatura spalin rejestrowana przed przepustnicą,  $p_{sp}$  - ciśnienie spalin rejestrowane przed przepustnicą,  $p_{sp2}$  - ciśnienie spalin rejestrowane za przepustnicą)



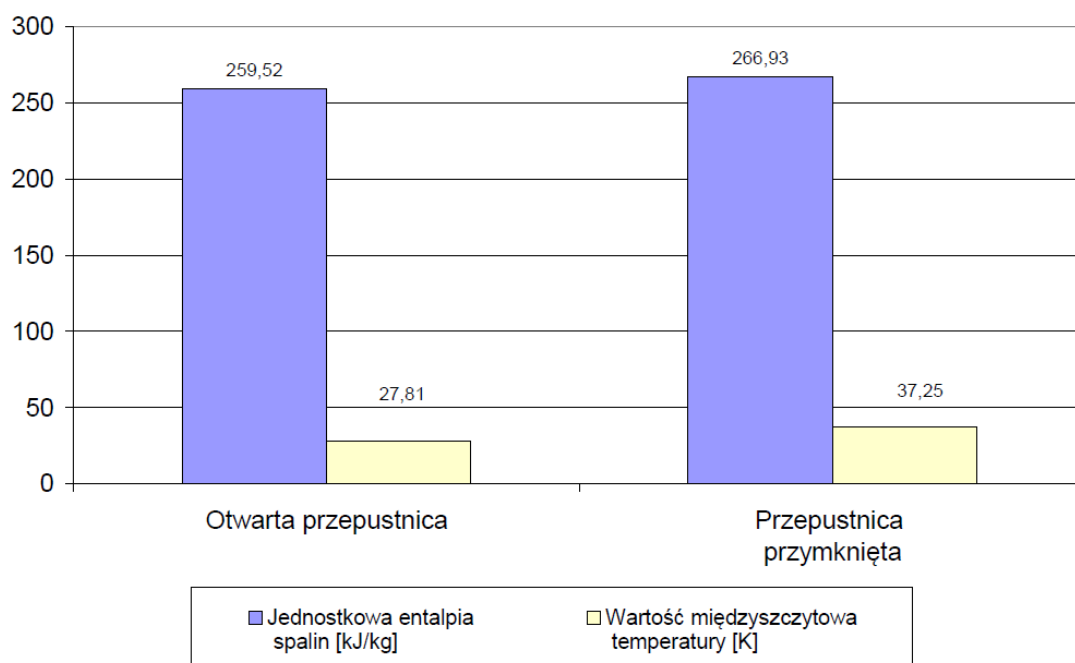
W tabeli 2 zestawiono wartości parametrów diagnostycznych wyznaczonych podczas badania silnika Farymann typ D10 w dwóch rozpatrywanych stanach technicznych kanału spalin wylotowych. Dane przedstawione w tabeli są wartościami średnimi, podanymi dla grupy 90 cykli roboczych silnika zarejestrowanych w czasie trwania pomiarów. Odnoszą się one do pojedynczego cyklu pracy silnika, celem dokonania analizy porównawczej zdefiniowanych wzorców miar zarejestrowanych sygnałów pomiarowych. Na rysunkach 7 oraz 8 przedstawiono uzyskane wartości parametrów diagnostycznych w postaci graficznej, dla bardziej czytelnej interpretacji danych liczbowych.

Tab. 2. Zestawienie wyznaczonych wartości parametrów diagnostycznych wraz z ich odchyleniami standardowymi

Parametr diagnostyczny		$\Delta T_{sr}$ [K]	h [kJ/kg]	$\Delta T/\Delta \tau \uparrow$ [K/s]	$\Delta T/\Delta \tau \downarrow$ [K/s]
Stan techniczny	Stan eksploatacyjny	Wartość międzyszczytowa temperatury [K]	Jednostkowa entalpia strumienia spalin [kJ/kg]	Szybkość wzrostu temperatury spalin dla jednej amplitudy [K/s]	Szybkość spadku temperatury spalin dla jednej amplitudy [K/s]
1	Wartość średnia	27,81	259,52	1064,71	615,80
	Odchylenie standardowe	2,20	5,33	226,91	110,08
2	Wartość średnia	37,25	266,93	1137,38	617,95
	Odchylenie standardowe	4,22	1,50	322,47	147,99



Rys. 7. Wartości parametrów diagnostycznych, jakimi są średnia szybkość wzrostu i spadku temperatury spalin wylotowych w obrębie jednego cyklu pracy silnika, w zależności od stanu technicznego kanału spalin wylotowych



Rys. 8. Wartości parametrów diagnostycznych, jakimi są: jednostkowa entalpia oraz wartość międzyszczytowa temperatury spalin wylotowych w obrębie jednego cyklu pracy silnika, w zależności od stanu technicznego kanału spalin wylotowych

## 5. Wnioski dotyczące porównania uzyskanych wyników obliczeń

Wartość międzyszczytowa temperatury spalin jest znacznie wyższa dla badania z przymkniętym wylotem spalin w stosunku do stanu referencyjnego (różnice wykraczające poza odchylenie standardowe). Parametr diagnostyczny, jakim jest entalpia spalin wylotowych uśredniona w obrębie jednego cyklu pracy silnika, wykazała wartość znacznie wyższą (poza odchyleniem standardowym) dla badania z przymkniętym wylotem spalin względem stanu referencyjnego. Dla parametru diagnostycznego, jakim jest szybkość wzrostu temperatury spalin w obrębie jednego cyklu pracy silnika widoczne są duże odchylenia standardowe tego parametru (nawet 20% wartości średniej). Zauważalna jest także znaczna rozbieżność wyników uzyskanych dla poszczególnych stanów technicznych. Wartość wyższą względem stanu referencyjnego zaobserwowano dla stanu z przymkniętym wylotem spalin (w granicach odchylenia standardowego). Szybkość wzrostu temperatury spalin informuje także o własnościach dynamicznych zastosowanej w czasie badań laboratoryjnych termopary [15]. Szybkość spadku temperatury spalin również charakteryzuje się znacznymi odchyleniami standardowymi (do 23% wartości średniej), podobnie jak w przypadku szybkości wzrostu temperatury spalin. Widoczna jest jednak mniejsza rozbieżność uzyskanych wartości średnich tego parametru diagnostycznego. Zauważono, że dla obu badań wartości szybkości wzrostu i spadku temperatury spalin są zbliżone.

Widoczne jest także, że szybkość spadku szybkozmiennej temperatury spalin jest około 2-krotnie mniejsza niż szybkość wzrostu tego parametru. Wynika to z wolniejszego niż nagrzewanie procesu stygnięcia termopary.

Zaobserwowano również, że parametry diagnostyczne wyznaczone na podstawie pomiarów szybkozmiennej temperatury spalin wylotowych takie jak: jednostkowa entalpia, wartość międzyszczytowa oraz szybkość wzrostu temperatury reagują podobnie na analogicznie wprowadzane zmiany drożności kanału powietrza dolotowego do silnika o ZS. Widoczne jest zatem zwiększenie dynamiki zmian temperatury spalin wylotowych pod wpływem zmniejszenia drożności kanału wylotu spalin. W konsekwencji może to prowadzić do powstawania pęknięć zmęczeniowych w wyniku niskocyklowego zmęczenia cieplnego kanału spalinowego.

W kolejnym etapie badań laboratoryjnych planowane jest wyznaczenie wykresów strumieniowych Sankey'a. Posłużą one jako tło energetyczne dla badań wpływu wybranych uszkodzeń silnika o ZS na szybkozmienny sygnał temperatury spalin wylotowych [4, 18].

## Bibliografia

- [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] Jaremkiwicz, M. (2011) Odwrotne zagadnienia wymiany ciepła, występujące w pomiarach nieustalanej temperatury płynów. Rozprawa doktorska. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- [3] Jaremkiwicz, M., Taler, J., (2016) Inverse determination of transient fluid temperature in pipelines. *Journal of Power Technologies*, 96(6), p. 385-389.
- [4] Korczewski, Z., (2018) Badania efektywności energetycznej nowo produkowanych paliw żeglugowych z zastosowaniem silnika diesla. *Journal of Polish CIMEEAC* Vol.13,1/5, s.53-64.
- [5] Korczewski, Z. (2015) Exhaust gas temperature measurements in diagnostics of turbocharged marine internal combustion engines. Part I. Standard Measurements. *Polish Maritime Research*, **22/1**(85), p. 47-54.
- [6] Korczewski, Z. (2016) Exhaust gas temperature measurements in diagnostics of turbocharged marine internal combustion engines. Part II. Dynamic Measurements. *Polish Maritime Research*. **23/1**(89), 68-76.
- [7] Korczewski, Z., (2017) Diagnostyka eksploatacyjna okrętowych silników spalinowych – tłokowych i turbinowych. Wybrane zagadnienia. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk.
- [8] Korczewski, Z. (2018) The method of energy-efficiency investigations of the newly produced marine fuels through the application of a diesel engine. *Materiały Konferencji MAPE, Explo-Ship 2018*. Zawiercie.
- [9] 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. *Combustion Engines*, **162**(3), p. 300-306.
- [10] 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.
- [11] Korczewski, Z., Zacharewicz, M. (2007) Diagnostyka symulacyjna układu turbodoładowania okrętowego tłokowego silnika spalinowego. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, **2**(169).
- [12] Marszałkowski, K., Puzdrowska, P. (2015) A laboratory stand for the analysis of dynamic properties of thermocouples. *Journal of Polish CIMEEAC*, **10**(1), p. 111-120.
- [13] Olczyk, A.(2007) Koncepcja pomiaru szybkozmiennnej temperatury gazu z uwzględnieniem dynamicznej składowej temperatury. *Pomiary Automatyka Kontrola*, **53** Bis/9, 576-579.
- [14] Puzdrowska, P. (2016) Determining the time constant using two methods and defining the thermocouple response to sine excitation of gas temperature. *Journal of Polish CIMEEAC*, **11**(1), p. 157-167.
- [15] Puzdrowska P. (2018) Metoda wyznaczania stałej czasowej termopary na podstawie pomiaru szybkozmiennnej temperatury spalin wylotowych silnika o ZS. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, Vol. 108, s. 115-133
- [16] Puzdrowska, P. (2018) Signal filtering method of the fast-varying diesel exhaust gas temperature, *Combustion Engines*, nr. 175(4), s.48-52.
- [17] Rudnicki J., Puzdrowska P., Marszałkowski K. (2017) Osłona termopary chłodzona wodą jako narzędzie zapobiegające zakłóceniom zewnętrznym podczas pomiarów temperatur

szybkozmiennych spalin w kanale wylotowym silnika okrętowego, Journal of Polish CIMAC.  
-Vol. 12., nr. 1, p. 97-104.

- [18] Zacharewicz, M. (2009) Metoda diagnozowania przestrzeni roboczych silnika okrętowego na podstawie parametrów procesów gazodynamicznych w kanale zasilającym turbosprężarkę. Rozprawa doktorska. AMW, Gdynia.