

METODA WYZNACZANIA STAŁEJ CZASOWEJ TERMOPARY NA PODSTAWIE POMIARU SZYBKOZMIENNEJ TEMPERATURY SPALIN WYLOTOWYCH SILNIKA O ZS

METHOD OF DETERMINING THE TIME CONSTANT OF THERMOCOUPLE BASED ON MEASUREMENT OF THE QUICK – CHANGING TEMPERATURES OF EXHAUST GASES IN MARINE DIESEL ENGINES

Patrycja Puzdrowska

Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa, Katedra Siłowni Morskich i Lądowych, e-mail: patpuzdr@pg.edu.pl

Streszczenie: W niniejszym artykule przedstawiono problematykę wyznaczenia stałej czasowej termopary. Wskazano na wagę właściwości dynamicznych termopar podczas eksperymentów. Przedstawiono stanowisko laboratoryjne, na którym przeprowadzono badania, mające na celu wyznaczenie stałych czasowych dwóch rodzajów termopar. Zaprezentowano trzy metody obliczania tego parametru. Określono wartość stałej czasowej, wyznaczonej metodą symulacji numerycznej wymiany ciepła między spoiną termopary a spalinami ją otaczającymi, przy założeniu wolnozmienności procesu, czyli przejścia z jednego stanu ustalonego do drugiego. W kolejnym kroku obliczono ten parametr również dla takiego przejścia, jednak dokonano tego na podstawie rzeczywistej szybkozmiennnej temperatury spalin, zarejestrowanej podczas badania na stanowisku laboratoryjnym. Jako trzecią metodę przedstawiono określanie wartości stałej czasowej dla warunków chwilowych, dla szybkozmiennnej temperatury rejestrowanej podczas eksperymentu, dla przebiegu pseudookresowego w obrębie trwania jednego cyklu roboczego silnika. Dokonano porównania i oceny uzyskanych wyników obliczeń, a co za tym idzie, użyteczności metody wyznaczenia stałej czasowej termopar.

Słowa kluczowe: silnik o ZS, termopara typu K, temperatura spalin, stała czasowa.

Abstract: The article presents issue of determining the time constant of thermocouple. The importance of dynamic properties of thermocouples during experiments was indicated. This paper presents the laboratory stand where experiments were made to determine the time constants of two types of thermocouples. Three methods of calculating this parameter were presented. The value of the time constant was determined by the numerical simulation of heat transfer between thermocouple's weld and the surrounding exhaust gases, assuming the slow – changing of the process, namely transition from the steady state to the other. In the next step this parameter was calculated for the same transition but it was based on real and quick – changing temperature of exhaust gases, recorded during the experiment on laboratory stand. As the third method there was shown determining the value of time constant for the

temporary conditions, for quick – changing temperature, recorded during the experiment, for the pseudo-periodic process within the duration of the cycle of engine. At the end, a comparison and evaluation of the calculation results was made, and the usefulness of the method of determining the time constant of thermocouples.

Keywords: marine diesel engine, thermocouple type K, temperature of exhaust gas, time constant.

1. WSTĘP

Pomiar szybkozmiennej temperatury spalin w kanale wylotowym silnika o ZS oraz wykorzystanie tego parametru do diagnozowania elementów konstrukcyjnych, ograniczających jego przestrzenie robocze, został uznany przez autorkę niniejszego opracowania za istotny ze względu na znaczny wpływ czynników zewnętrznych na otrzymywane wyniki badań. Podczas pomiarów temperatury najważniejszym parametrem, określającym właściwości dynamiczne termopary, jest jej stała czasowa. Właściwe zatem wyznaczenie jej wartości może pozwolić na prawidłowe obliczenia i analizy oraz obróbkę matematyczną wyników, uzyskanych podczas badań laboratoryjnych.

Analizując dostępną wiedzę dotyczącą wyznaczania stałych czasowych [Pawlak 1995; Wawszczak i Gębarowski 2013; Korczewski i Puzdrowska 2015; Marszałkowski i Puzdrowska 2015; Puzdrowska 2016], zauważono niejednoznaczność metod wyznaczania tego parametru. Można określać go zarówno analitycznie, jak i doświadczalnie. Jednak podczas wyznaczania stałej czasowej na podstawie wyników badań laboratoryjnych nasuwa się pytanie, dla jakiego procesu powinno się to robić: wolno czy szybkozmiennego. Należy także pamiętać, że właściwości dynamiczne termopary nie zależą od typu wymuszeń, jakim się ją poddaje.

2. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE CZUJNIKÓW TERMIELEKTRYCZNYCH

W celu opisanía właściwości dynamicznych czujnika termoelektrycznego należy w pierwszej kolejności wyjaśnić zasadę działania termopary. W obwodzie elektrycznym, składającym się z co najmniej dwóch różnych materiałów metali, różnica temperatur spoin powoduje powstanie siły termoelektrycznej, a w konsekwencji przepływ prądu elektrycznego w zamkniętym obwodzie złożonym z dwóch metali. Warunkiem przepływu prądu jest umieszczenie spoiny pomiarowej i spoiny odniesienia w ośrodkach o różnych temperaturach. Materiały stosowane w termoelementach powinny charakteryzować się takimi właściwościami, jak:

- wysoka temperatura topnienia;
- wysoka dopuszczalna temperatura pracy ciągłej;



- duża trwałość;
- duża odporność na wpływ czynników atmosferycznych;
- niezmienność właściwości w czasie;
- duża powtarzalność właściwości przy produkcji;
- możliwie małe: rezystywność¹ i współczynnik temperaturowy rezystancji²;
- ciągła i liniowa zależność siły termoelektrycznej od temperatury.

Wybór materiałów stosowanych do budowy czujników termoelektrycznych jest wynikiem kompromisu pomiędzy wyżej wymienionymi wymaganiami. Przy niemal wszystkich zastosowaniach przemysłowych termoelementy muszą być chronione przed mechanicznymi i chemicznymi działaniami ośrodka poprzez zastosowanie odpowiednich osłon ochronnych. Natomiast zadaniem osłon izolacyjnych jest wzajemne elektryczne odizolowanie termoelektrod. Odpowiedni dobór materiału na osłony warunkuje poprawną pracę czujnika, przede wszystkim zapewnia niezmienność charakterystyki termoelementu pod wpływem czynników zewnętrznych oraz decyduje o trwałości czujnika. Od materiału osłony zależą również jego właściwości dynamiczne.

Właściwości dynamiczne czujników temperatury mogą być wyznaczone w sposób doświadczalny lub analityczny. W celu analitycznego ich wyznaczenia na podstawie znajomości praw fizyki, opisujących procesy transportu ciepła oraz konstrukcji czujnika, należy stworzyć jego matematyczny model. Najczęściej czyni się przy tym szereg uproszczeń. Do opracowania modelu matematycznego wykorzystuje się równania wymiany ciepła pomiędzy spoiną pomiarową a otaczającym ją ośrodkiem. Jednak wartości wielu wielkości fizycznych, uwzględnianych w modelu matematycznym, mogą odbiegać od rzeczywistych, dlatego szeroko rozpowszechniona jest metoda identyfikacji elementów toru pomiarowego i ich właściwości dynamicznych w sposób doświadczalny. Najczęściej korzysta się z realizacji eksperymentalnej funkcji skoku jednostkowego. Na podstawie zarejestrowanej w trakcie pomiarów odpowiedzi czasowej układu na skok jednostkowy można określić ogólną postać przewidywanej transmitancji elementu, a także wyznaczyć wartości współczynników tej transmitancji (opóźnienie, wzmocnienie i stałe czasowe).

Rozpatrując „idealny czujnik temperatury”, przyjmuje się następujące założenia upraszczające:

- nieskończenie duża przewodność cieplna λ materiału czujnika, co jest równoznaczne jednakowej temperaturze w całej objętości czujnika;
- stałość warunków wymiany ciepła przez konwekcję ($\alpha = \text{const}$);
- czujnik zanurzony jest całkowicie w badanym ośrodku i nie zachodzi wymiana ciepła z innym ośrodkiem;

¹ Rezystywność (opór właściwy) ρ [$\Omega \cdot \text{m}$] – wielkość charakteryzująca materiały pod względem przewodnictwa elektrycznego.

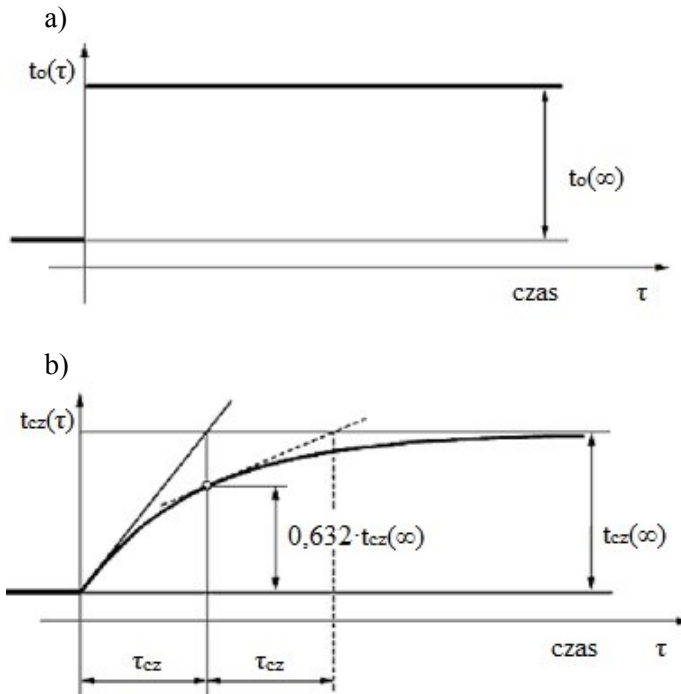
² Współczynnik temperaturowy rezystancji α lub TWK [K^{-1}] – względna zmiana rezystancji danego materiału przy zmianie temperatury o 1K.



- brak oddziaływania czujnika na badany ośrodek, co oznacza, że pojemność cieplna ośrodka jest znacznie większa od pojemności cieplnej czujnika i obecność czujnika nie wpływa na deformację pola temperatury badanego ośrodka.

Właściwości dynamiczne rzeczywistych czujników temperatury pod wieloma względami odbiegają od właściwości czujnika idealnego.

Parametrem określającym, jakie cechy dynamiczne ma czujnik temperatury o określonej konstrukcji, jest stała czasowa. Stała czasowa zgodnie ze znaną definicją charakteryzuje czas, po którym temperatura czujnika (czyli temperatura wskazywana) osiągnie 0,632 wartości temperatury ośrodka. Chcąc przedstawić stałą czasową termopary na rysunku, wykorzystuje się tzw. charakterystykę dynamiczną czujnika. Można z niej wyznaczyć stałą czasową jako styczną do charakterystyki w dowolnym jej punkcie (rys. 1).



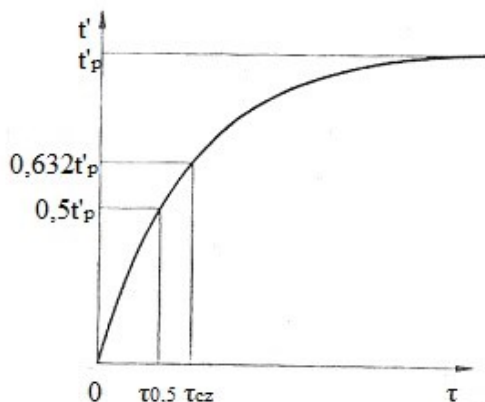
Rys. 1. Charakterystyka dynamiczna czujnika temperatury: a – przebieg czasowy temperatury mierzonej, b – przebieg temperatury wskazywanej przez termoparę (t_o – temperatura ośrodka, t_{cz} – temperatura czujnika)

Fig. 1. Dynamic characteristic of the temperature sensor: a – time course of measured temperature, b – temperature course indicated by the thermocouple (t_o – fluid temperature, t_{cz} – sensor temperature)



Stalą czasową można też wyznaczyć na podstawie pomiaru tzw. czasu wartości połowicznej $\tau_{0,5}$, tj. czasu, po którym czujnik uzyskuje połowę wartości temperatury ośrodka badanego (rys. 2). Wówczas otrzymuje się zależność:

$$\tau_{cz} = \frac{\tau_{0,5}}{\ln 2} = \frac{\tau_{0,5}}{0,693} \quad (1)$$



Rys. 2. Odpowiedź czujnika temperatury o parametrach skupionych na wymuszenie skokowe oraz interpretacja stałej czasowej

Fig. 2. Temperature sensor response to concentrated parameters on abrupt force and interpretation of the time constant

Źródło: [Wiśniewski 1983].

Należy zwrócić uwagę, że powyższy wzór ma charakter przybliżony, ponieważ rozpatrywany jest czujnik idealny bez osłony. Dla rzeczywistego czujnika należy uwzględnić zależność współczynnika α od temperatury badanego ośrodka, jego rodzaju, wartości skoku temperatury, wpływu osłony, zjawiska rozchodzenia się ciepła wewnątrz czujnika i wielu innych czynników. Dlatego najlepszą metodą określania właściwości dynamicznych czujników temperatury jest ich doświadczalne badanie w warunkach zbliżonych do tych, w których będą stosowane. Wyznaczając model matematyczny reakcji czujnika na skokową zmianę temperatury, przyjmuje się, że czujnik jest członem dynamicznym o parametrach skupionych, inercyjnym, pierwszego rzędu, opisanym następującym równaniem:

$$t_{cz} = t_o \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_{cz}}} \right) \quad (2)$$

gdzie:

t_o – temperatura ośrodka,

t_{cz} – temperatura czujnika,
 τ – czas,
 τ_{cz} – stała czasowa.

Po przyjęciu następujących założeń:

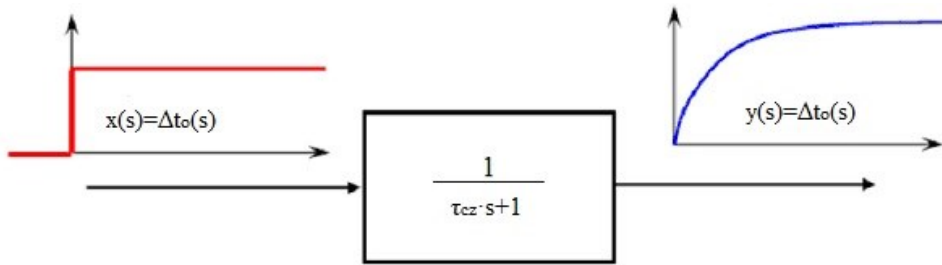
- w chwili początkowej $\tau = 0$ przed umieszczeniem termoelementu w ośrodku badanym temperatura termopary jest ustalona i równa temperaturze otoczenia;
- termoelement nie odprowadza ciepła do otoczenia, dlatego dopływ ciepła do niego jest równy akumulacji ciepła w nim;

oraz odpowiednich analizach matematycznych otrzymuje się wzór na transmitancję termoelementu:

$$G(s) = \frac{\Delta t_{cz}(s)}{\Delta t_o(s)} = \frac{1}{\tau_{cz} \cdot s + 1} \quad (3)$$

gdzie s – operator Laplace’a.

Obiekt dynamiczny, opisany powyższym wzorem, jest członem inercyjnym pierwszego rzędu (rys. 3).



Rys. 3. Termoelement jako człon dynamiczny

Fig. 3. Thermocouple as a dynamic element

Równie istotny jak sposób wyznaczania stałej czasowej (analitycznie czy doświadczalnie) jest wybór odpowiedniego sygnału, uzyskanego podczas eksperymentu dla metody doświadczalnej. Stałą czasową spalin w kanale wylotowym silnika o ZS można wyznaczyć dla sygnału rejestrowanego podczas przejścia z jednego stanu ustalonego do drugiego (procesy ciepłno-przepływowe, okresowe w ujęciu wolnoziennym).

Drugą metodą jest określenie stałej czasowej dla warunków chwilowych (proces quasi-okresowy w obrębie jednego cyklu pracy silnika o ZS). Dla jednego zatem rodzaju ośrodka badanego (spaliny) oraz dla określonych jego parametrów (temperatura, prędkość), a także dla jednego rozwiązania konstrukcyjnego termopary, możliwe jest wyznaczenie trzech różnych wartości stałych czasowych. Jest to jednak konieczne na wstępnym etapie badań eksperymentalnych, ponieważ nie jest



wiadome, jaką metodą, dla jakiego płynu i w jakim zakresie temperatur parametr ten został wyznaczony przez producenta termopary. Chcąc zatem wyznaczyć stałą czasową dla spalin silnikowych, należy wykonać badania dla parametrów ośrodka, jakie będą panowały podczas badań eksperymentalnych silnika laboratoryjnego na potrzeby doktoratu.

3. STANOWISKO LABORATORYJNE SILNIKA O ZS

Na stanowisku laboratoryjnym przeprowadzono badania empiryczne jednocylindrowego, czterosuwowego, wysokoprężnego silnika o ZS Farymann Diesel typu D10 (rys. 4, 5a, 5b). Podstawowe dane techniczne silnika są następujące:

- moc nominalna 5,9 kW;
- prędkość obrotowa nominalna 1500 min⁻¹;
- moment obrotowy nominalny 38 N·m;
- średnica cylindra 90 mm;
- skok tłoka 120 mm;
- stopień sprężania 22:1;
- pojemność skokowa 765 cm³.

W trakcie badań rejestrowano następujące parametry pracy silnika:

- temperatura spalin wylotowych rejestrowana termoparą typu K w osłonie ceramicznej;
- temperatura spalin wylotowych rejestrowana termoparą typu K, chłodzona dodatkowo płaszczem wodnym;
- ciśnienie spalin w kanale wylotowym;
- górne martwe położenie tłoka;
- natężenie prądu obciążenia prądnicy (twornika);
- napięcie na zaciskach twornika prądnicy;
- otwarcie zaworu wylotu spalin.

W tabeli 1 pokazano zestawienie mierzonych parametrów kontrolnych oraz zastosowane urządzenia pomiarowe, które zostały użyte podczas realizacji badań.

Do rejestracji sygnałów temperatur i ciśnień jako wielkości szybkozmiennych, a także sygnału górnego martwego położenia tłoka, użyto wielofunkcyjnego modułu pomiarowo-rejestrującego DT-9805 firmy Data Translation, natomiast do rejestrowania wartości zastosowano oprogramowanie Matlab.

W trakcie badania utrzymywana była stała prędkość obrotowa wału korbowego silnika 1280 min⁻¹. Częstotliwość próbkowania wynosiła 8000 Hz.

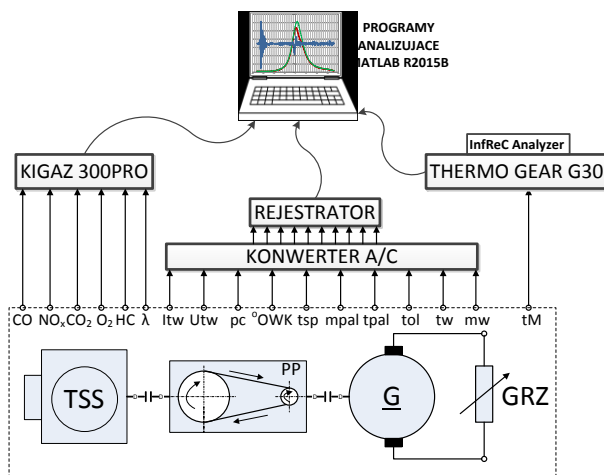
Badanie przeprowadzono bez obciążenia silnika, natomiast przedstawione wyniki są średnią z kilkunastu pomiarów następujących po sobie w tych samych warunkach.



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

Table 1. Parameters registered at the laboratory stand of a single-cylinder self-ignition engine Farymann Diesel type D10

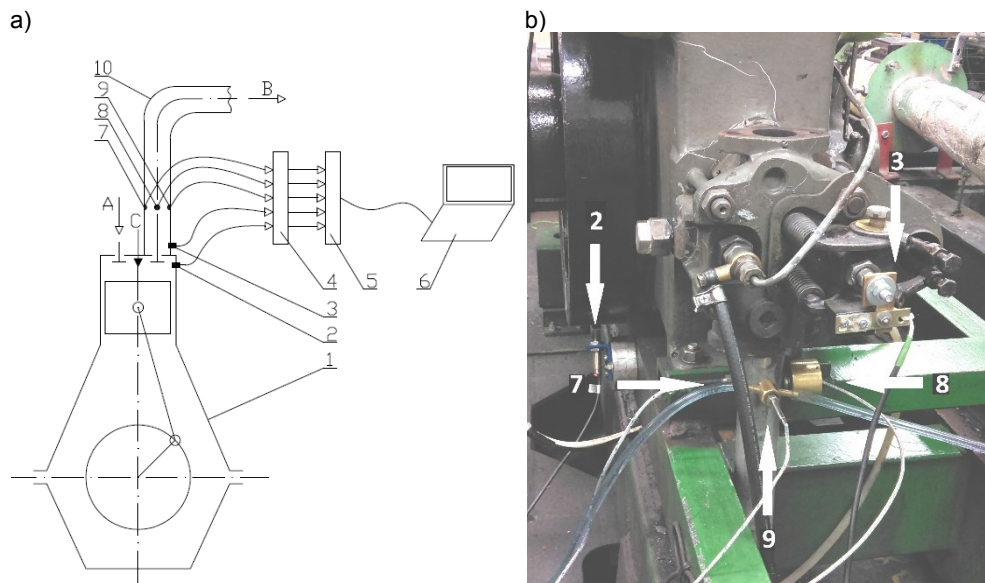
Lp.	Parametr	Urządzenie pomiarowe	Jednostka	Zakres pomiarowy
1	Temperatura spalin – T_{sp1}	Termopara typu K ze spoiną odkrytą o średnicy spoiny 0,2 mm, z płaszczem ceramicznym	°C	0-1000
2	Temperatura spalin – T_{sp2}	Termopara typu K ze spoiną zgrzewaną do płaszcza o średnicy zewnętrznej 0,5 mm, wykonanego z Inconelu	°C	0-1000
3	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)
4	Prędkość obrotowa (położenie kątowe w °OWK) wału korbowego silnika – n Górne martwe położenie – GMP	Indukcyjny czujnik prędkości obrotowej i GMP	min^{-1}	0–3000
5	Natężenie prądu obciążenia prądnicy (twornika) – I_{tw}	Miernik natężenia prądu elektrycznego	A	0–15
6	Napięcie na zaciskach twornika prądnicy – U_{tw}	Miernik napięcia prądu elektrycznego	V	0–250
7	Sygnał otwarcia zaworu wylotowego	Transoptor szczelinowy z komparatorem LM393	V mm	0-5 10 (szczelina)



Rys. 4. Schemat ideowy stanowiska badawczego z układem przetwarzania i rejestracji sygnałów pomiarowych: TSS – silnik Farymann Diesel typu D10; PP – przekładnia pasowa; \underline{G} – prądnica prądu stałego; GRZ – układ grzałek

Fig. 4. Schematic diagram of the test stand with the processing and recording system of measurement signals: TSS – engine Farymann Diesel type D10; PP – belt transmission; \underline{G} – direct current generator; GRZ – heaters system

Źródło: [Korczewski 2018].



Rys. 5. Stanowisko laboratoryjne: a) schemat stanowiska z zaznaczonymi czujnikami parametrów rejestrowanych podczas pomiarów: 1 – silnik Farymann Diesel typu D10, 2 – czujnik GMP, 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, B – spaliny, C – paliwo; b) widok stanowiska z zaznaczonymi czujnikami parametrów 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

Fig. 5. a) The laboratory stand: a) diagram of a laboratory bench with marked sensors of parameters registered during measurements: 1 – engine Farymann Diesel type D10, 2 – top dead center position sensor, 3 – exhaust valve opening sensor, 4 – converter A/C, 5 – recorder, 6 – analysis program, 7 – thermocouple in a ceramic cover, 8 – pressure sensor, 9 – thermocouple water-cooled, 10 – exhaust gases channel, A – air, B – exhaust gases, C – fuel; b) view of the laboratory stand with the sensors of parameters registered during the measurements: 2 – top dead center position and rotation speed sensor, 7 – thermocouple in a ceramic cover, 9 – thermocouple water-cooled, 3 – exhaust valve opening sensor, 8 – pressure sensor in the outlet channel

4. METODY WYZNACZANIA STAŁEJ CZASOWEJ

4.1. Wyznaczanie stałej czasowej termopary typu K metodą symulacji numerycznej

W ramach badań identyfikacyjnych przeprowadzono symulację numeryczną transportu ciepła pomiędzy spoiną pomiarową a omywającymi ją spalinami dla

dwóch rozwiązań konstrukcyjnych termopary typu K. W obliczeniach rozważono termoparę ze spoiną odkrytą w osłonie ceramicznej oraz termoparę ze spoiną zgrzewaną do płaszcza wykonanego z Inconelu, zabudowanego w osłonie chłodzonej wodą. Dla obu termopar wyznaczono wartości stałych czasowych, przyjmując do obliczeń dane zgodne z warunkami pomiarów. Algorytm realizacji obliczeń przedstawili Korczewski i Puzdrowska [2015]. Poniżej zatem przedstawiono jedynie zależności, na podstawie których wyliczono stałe czasowe.

Stała czasowa dla termopary ze spoiną odkrytą:

$$\tau_{cz} = \frac{C_{nicr}}{A_{nicr} \cdot \alpha_{wp}} \quad (4)$$

gdzie:

C_{nicr} – pojemność cieplna spoiny pomiarowej,
 A_{nicr} – powierzchnia spoiny pomiarowej,
 α_{wp} – współczynnik wnikania ciepła.

Stała czasowa termopary ze spoiną zgrzewaną do płaszcza:

$$\tau_{cz} = \frac{C_p}{A_{zp} \cdot \alpha_{wp}} \quad (5)$$

gdzie:

C_p – pojemność cieplna Inconelu,
 A_{zp} – powierzchnia płaszcza,
 α_{wp} – współczynnik wnikania ciepła.

Parametrem mającym znaczny wpływ na wartość stałej czasowej jest współczynnik wnikania ciepła, określony zależnością:

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda_{sp}}{d} \quad (6)$$

gdzie:

λ_{sp} – przewodność cieplna spalin w określonej temperaturze,
 d – charakterystyczny wymiar liniowy, np. średnica spoiny pomiarowej,
 Nu – liczba Nusselta, charakteryzująca zależność intensywności przejmowania ciepła od pola temperatury w warstwie przyściennej strumienia spalin.



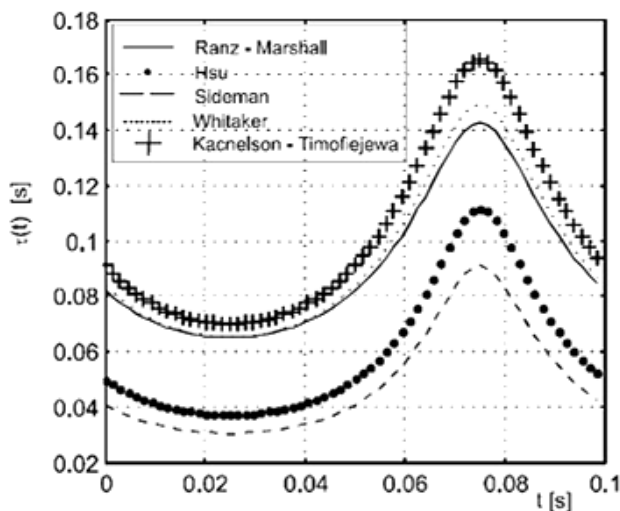
Należy zwrócić uwagę, że wartość współczynnika wnikania ciepła, a co za tym idzie, stałej czasowej w znaczącym stopniu zależy od wyboru metody wyznaczania liczby Nusselta [Jamróz i Nabielec 2007]. Zastosowano w obliczeniach zależność zaproponowaną przez Ranz-Marshalla (tab. 2), jednak jak wynika z danych na rysunku 6 dla postaci liczby Nu, zaproponowanej przez różnych autorów wartości wyznaczonych stałych czasowych, mogą one znacznie odbiegać od siebie.

Tabela 2. Modele liczby Nusselta dla opływu kuli

Table 2. Nusselt number of models for flow around a sphere

Autor równania	Przedział stosowności	Postać liczby Nu
Ranz – Marshall	$Re \leq 2 \cdot 10^5$	$2+0.6 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.33}$
Hsu	$Re \leq 2 \cdot 10^5$	$0.921 \cdot (Re \cdot Pr)^{0.5}$
Sideman	$Re \leq 2 \cdot 10^5$	$1.13 \cdot (Re \cdot Pr)^{0.5}$
Whitaker	$Re \leq 8 \cdot 10^4$	$2+(0.4 \cdot Re^{0.5} \cdot 0.06 \cdot Re^{0.67}) \cdot Pr^{0.4}$
Kacnelson i Timofiejewa	$1 \leq Re \leq 3 \cdot 10^5$	$2+0,03 \cdot Re^{0.54} \cdot Pr^{0.33} + 0,35 \cdot Re^{0.58} \cdot Pr^{0.356}$

Źródło: [Jamróz i Nabielec 2007].



Rys. 6. Przykładowy przebieg stałej czasowej dla różnych modeli liczby Nusselta dla opływu kuli

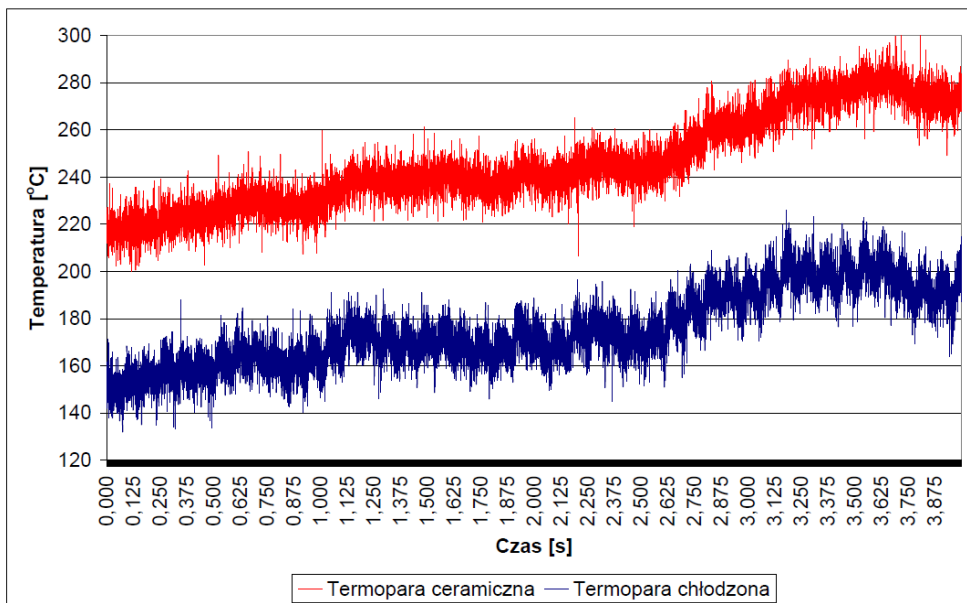
Fig. 6. An example of the time constant for the Nusselt number of different models for flow around a sphere

Źródło: [Jamróz i Nabielec 2007].

W przypadku obliczeń stałej czasowej na podstawie symulacji numerycznej wymiany ciepła między spoiną pomiarową a omywającymi ją spalinami uwzględniono przejście od jednego stanu ustalonego do drugiego. Założono zatem, że procesy ciepłno-przepływowo w kanale wylotu spalin są wolnozmiennymi procesami przejściowymi. Obliczenia wykonano dla uśrednionych wartości parametrów stanu procesu w czasie dłuższym niż czas trwania jednego cyklu pracy silnika o ZS.

4.2. Wyznaczanie stałej czasowej na podstawie wyników badań empirycznych dla przejścia z jednego stanu ustalonego do drugiego

W celu weryfikacji wartości stałych czasowych dla obu rozwiązań konstrukcyjnych termopary przeprowadzono badania empiryczne na stanowisku laboratoryjnym jednocylindrowego silnika o ZS Farymann Diesel typu D10. Były to badania z zastosowaniem dwóch różnych termopar w celu porównania wartości ich stałych czasowych i wyboru rozwiązania o najlepszych właściwościach dynamicznych. Po przeprowadzeniu badań na stanowisku laboratoryjnym silnika o ZS wyznaczono przebiegi szybkozmiennnej temperatury spalin jako funkcji czasu dla obu termopar (rys. 7), następnie na ich podstawie wyznaczono stałe czasowe.



Rys. 7. Przebiegi zmienności temperatur spalin wylotowych rejestrowane dwoma różnymi termoparami, na podstawie których wyznaczono stałe czasowe dla przejścia z jednego stanu ustalonego do drugiego

Fig. 7. *Fluctuations of flue gas outlet temperatures recorded by two different thermocouples, on the basis of which time constants were determined for the transition from one steady state to another*



Na rysunku 7 widoczny jest wzrost temperatury spalin w kanale wylotowym o około 50°C w czasie kilku sekund, jest to zatem proces wolnozmienny w obrębie więcej niż jednego cyklu roboczego silnika o ZS, dlatego też należy tu mówić o stałej czasowej dla procesu przejściowego.

Wyznaczono stałe czasowe obu termopar poprzez określenie czasu połówkowego $t_{0,5}$, po którym temperatura czujnika osiągnie połowę wartości temperatury ośrodka (rys. 2).

Stałą czasową oblicza się wtedy z zależności (1) [Wiśniewski 1983].

4.3. Wyznaczanie stałej czasowej na podstawie wyników badań empirycznych dla warunków chwilowych

Drugą zaproponowaną metodą pozwalającą na określenie właściwości dynamicznych termopary jest wyznaczenie stałej czasowej dla warunków chwilowych.

Na rysunku 8 przedstawiono przebiegi szybkozmiennnej temperatury spalin w czasie krótszym niż czas trwania jednego cyklu pracy silnika o ZS, dla dwóch rozpatrywanych rozwiązań konstrukcyjnych termopar.

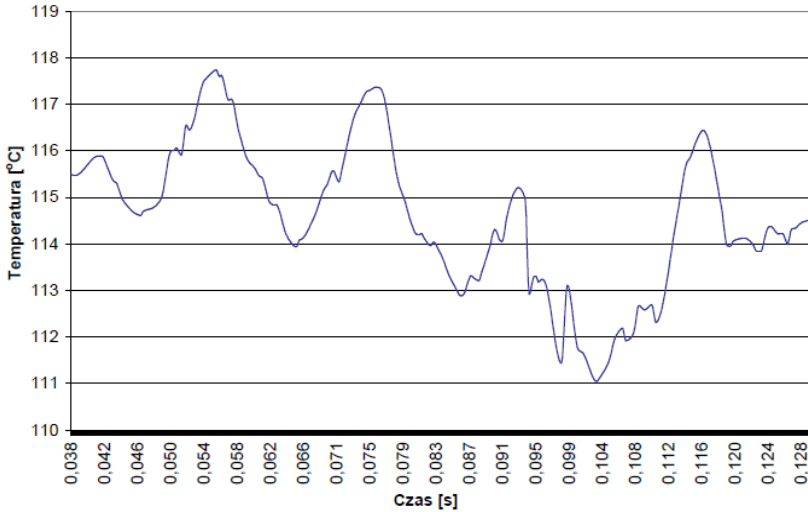
Określono wartość stałej czasowej dla warunków chwilowych z sygnału rejestrowanego przez czujnik temperatury podczas badań laboratoryjnych dla wybranego stanu ustalonego.

Dla jednego z boczów wyznaczono styczną i określono czas połówkowy $t_{0,5}$ (rys. 2) oraz obliczono stałą czasową dla warunków chwilowych zgodnie z zależnością (1).

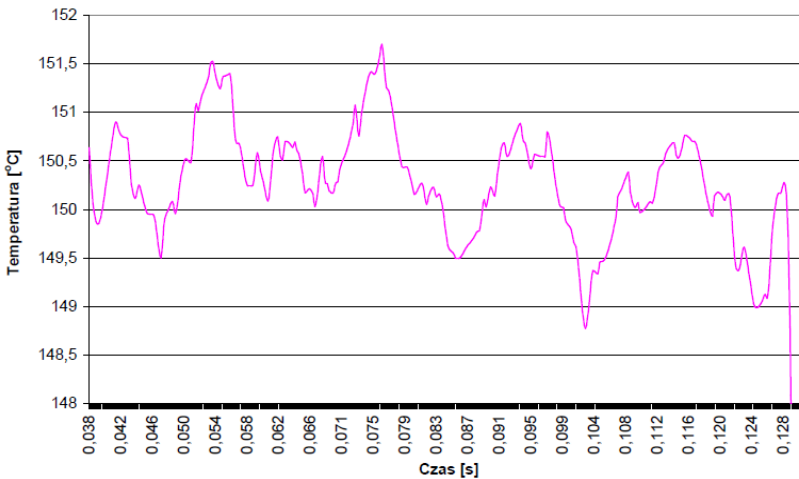
Podczas badania uzyskano przebieg quasi-okresowy, ponieważ widoczne są przesunięcie amplitudowe i fazowe, a także zniekształcenie sygnału, co wynika z wpływu czynników zewnętrznych na rejestrowany parametr (rys. 9).

Jak wynika z charakteru przebiegu na rysunku 9, będącym interpretacją graficzną stałej czasowej dla warunków chwilowych, kąt pomiędzy styczną do rejestrowanego sygnału a osią czasu jest dużo mniejszy niż dla przebiegu wolnozmiennego (rys. 7). W związku z tym stała czasowa otrzymana tą metodą powinna mieć mniejszą wartość.

a)



b)



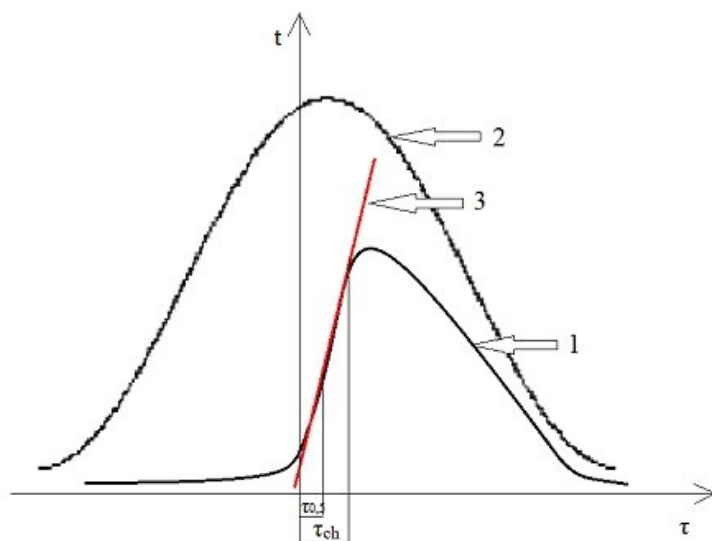
Rys. 8. Przebiegi temperatury spalin wylotowych rejestrowane dwoma termoparami, na podstawie których wyznaczono stałe czasowe dla warunków chwilowych:

- a) temperatura rejestrowana termoparą chłodzoną,
- b) temperatura rejestrowana termoparą w płaszczu ceramicznym

Fig. 8. Flue gas outlet temperatures recorded by two thermocouples, on the basis of which time constants were determined for instantaneous conditions:

- a) temperature recorded with a cooled thermocouple,
- b) temperature recorded with a thermocouple in a ceramic jacket





Rys. 9. Interpretacja graficzna wyznaczania stałej czasowej dla warunków chwilowych;
1 – temperatura rejestrowana, 2 – temperatura rzeczywista (po korekcji),
3 – styczna do rejestrowanego sygnału, $\tau_{0.5}$ – czas półwkowy, τ_{ch} – stała czasowa dla warunków chwilowych

Fig. 9. Graphical interpretation of time constant determination for instantaneous conditions;
1 – recorded temperature, 2 – actual temperature (after correction),
3 – tangent to the recorded signal, $\tau_{0.5}$ – half time,
 τ_{ch} – time constant for momentary conditions

5. WYBÓR METODY WYZNACZANIA STAŁEJ CZASOWEJ

W wyniku badań symulacyjnych dowiedziono, że stała czasowa termopary ze spoiną odkrytą ma mniejszą wartość od stałej czasowej dla termopary ze spoiną izolowaną (tab. 3). Jest to zależność zgodna z istniejącą wiedzą [Puzdrowska 2016].

W przypadku stałej czasowej dla warunków chwilowych otrzymano wartość rzędu kilku milisekund, co wynika z charakteru procesu cieplno-przepływowego w kanale wylotu spalin, którego parametry rejestrowano. Jest to proces szybkozmienny oraz quasi-okresowy w obrębie trwania jednego cyklu pracy silnika.

Wartość stałej czasowej, wyznaczonej metodą symulacji numerycznej, procesu wymiany ciepła między spoiną pomiarową a spalinami jest rzędu kilkudziesięciu milisekund, pomimo założonych podobnych parametrów wejściowych. Rozbieżność ta może wynikać z różnic wartości parametrów wejściowych – spaliny zdefiniowane w symulacji mogą mieć parametry znacznie odbiegające od warunków rzeczywistych procesu przepływu spalin w silniku laboratoryjnym.

Największe wartości stałych czasowych (rzędu kilkuset milisekund) otrzymano dla badania laboratoryjnego, podczas którego rejestrowano temperaturę spalin w trakcie przejścia z jednego stanu ustalonego do drugiego. Wynika to z wolnozmiennego charakteru badanego procesu przepływu spalin w kanale.

Tabela 3. Wartości stałych czasowych wyznaczone dwoma metodami dla różnych rozwiązań konstrukcyjnych termopary

Table 3. Values of time constants determined by two methods for different thermocouple construction solutions

Konstrukcja termopary	Stała czasowa – badanie (warunki chwilowe) [s]	Stała czasowa – symulacja [s]	Stała czasowa – badanie (przejście z jednego stanu ustalonego do drugiego) [s]
Termopara ze spoiną odkrytą w osłonie ceramicznej	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$42 \cdot 10^{-3}$	$447 \cdot 10^{-3}$
Termopara ze spoiną zgrzewaną chłodzoną wodą	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$78 \cdot 10^{-3}$	$532 \cdot 10^{-3}$

Za główną przyczynę różnic w wartościach otrzymanych stałych czasowych uznano metodę wyznaczania stałej czasowej. Znaczący jest tu charakter procesu, dla którego wyznacza się przebieg szybkozmiennej temperatury spalin oraz stałą czasową.

Ważne jest rozpatrzenie wartości stałej czasowej termoelementu w zależności od wartości pola powierzchni wymiany ciepła zgodnie z ogólnym wzorem:

$$\tau_{cz} = \frac{m \cdot c}{A \cdot \alpha} \quad (7)$$

gdzie:

- c – ciepło właściwe materiału czujnika temperatury,
- m – masa czujnika temperatury,
- A – pole powierzchni przepływu ciepła,
- α – współczynnik wnikania ciepła.

Zgodnie z powyższym, dążąc do jak najmniejszej stałej czasowej (największej dynamiki czujnika), przy założeniu niezmienności parametrów c oraz α , a także pamiętając, że wraz ze spadkiem pola powierzchni wymiany ciepła spada masa czujnika, otrzymuje się podczas obliczeń średnicę termoelementu o wartości tak niskiej, że niemożliwej do wykonania w procesie produkcji.

Wyznaczenie stałych czasowych dla dwóch różnych konstrukcyjnie termopar miało na celu podjęcie decyzji dotyczącej wyboru i kupna termoelementu do dalszych badań eksperymentalnych. Dla obu metod wyznaczania tego parametru czujnikiem o szybszej odpowiedzi na zadany sygnał szybkozmiennej temperatury okazała się termopara ze spoiną odkrytą. Jednak znaczący podczas badań na



stanowisku laboratoryjnym jest mniej zakłócony oraz opóźniony w mniejszym stopniu sygnał z termopary chłodzonej wodą. Oba zatem rozwiązania uznano za przydatne w dalszych eksperymentach.

Ponieważ stała czasowa została wyznaczona w celu określenia właściwości dynamicznych termopar, które posłużą do pomiarów szybkosziennej temperatury spalin w obrębie jednego cyklu pracy silnika, to do dalszych obliczeń zdecydowano się zastosować wartość stałej czasowej dla warunków chwilowych wyznaczonej w sposób eksperymentalny. Wyklucza to błąd, który może dotyczyć wyników obliczeń uzyskanych na drodze symulacji, wynikający z przyjętych wartości parametrów spalin użytych podczas obliczeń oraz wartości uśrednionych lub odbiegających od rzeczywistych, a także z błędów podczas obliczeń. Odrzucono również ten parametr, wyznaczony dla przejścia z jednego stanu ustalonego do drugiego, jako przydatny w dalszych analizach, ze względu na charakter procesu, dla którego go określono.

6. PODSUMOWANIE

Szybkoszmienna temperatura spalin pozwala na uzyskanie informacji diagnostycznych, dotyczących stanu technicznego elementów konstrukcyjnych, ograniczających przestrzenie robocze silnika spalinowego o ZS. Chcąc opracować metodę diagnozowania, opartą na tym parametrze, należy uwzględnić takie wymagania, jak: wysoka dokładność pomiarów, technologiczność oraz ergonomiczność, a także trzeba wziąć pod uwagę koszty zakupu i wdrożenia specjalistycznej aparatury pomiarowej.

Należy pamiętać również o minimalizowaniu wpływu czynników zewnętrznych na dokładność pomiarów. Jednak za równie ważny aspekt uznano określenie wartości stałej czasowej termopary, stosowanej podczas pomiarów szybkosziennej temperatury spalin. Jeżeli diagnozowanie parametryczne przestrzeni roboczych silnika o ZS ma być jak najbardziej precyzyjne, to stała czasowa powinna być określona dla podobnych warunków (skład i parametry spalin) oraz charakteru procesu (quasi-okresowość w obrębie jednego cyklu pracy silnika).

Tak wyznaczony parametr pozwoli na dalsze eksperymentalne i analityczne, dążące do opisanie metody diagnozowania przestrzeni roboczych silnika o ZS na podstawie szybkosziennej temperatury spalin w kanale wylotowym.

LITERATURA

- Brown, C., Kee R.J., Irwin, G.W., McLoone, S.F., Hung, P.C., 2008, *Identification Applied to Dual Sensor Transient Temperature Measurement*, UKACC Int. Control Conference, Manchester.
- Jamróz, P., Nabelec, J., 2007, *Modele matematyczne czujników do pomiaru zmiennej temperatury gazu przy okresowo zmiennej prędkości*, *Pomiary Automatyka Kontrola*, nr 9 Bis, Warszawa, s. 232–235.
- Jaremkiwicz, M., 2011, *Odwrotne zagadnienia wymiany ciepła, występujące w pomiarach nieustalonej temperatury płynów*, rozprawa doktorska, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- Jaremkiwicz, M., Taler, J., 2016, *Inverse Determination of Transient Fluid Temperature in Pipelines*, *Journal of Power Technologies*, vol. 96, no. 6, s. 385–389.
- Jatana, G.S., Magee, M., Fain, D., Naik, S.V., Shaver, G.M., Lucht, R.P., 2015, *Simultaneous High-Speed Gas Property Measurements at the Exhaust Gas Recirculation Cooler Exit and at the Turbocharger Inlet of a Multi-Cylinder Diesel Engine Using Diode-Laser-Absorption Spectroscopy*, *Applied Optics*, vol. 54, no. 5, Washington, s. 1220–1231.
- Korczewski, Z., 2015, *Exhaust Gas Temperature Measurements in Diagnostics of Turbocharged Marine Internal Combustion Engines. Part I. Standard Measurements*, *Polish Maritime Research*, nr 22/1(85), Gdańsk, s. 47–54.
- Korczewski, Z., 2016, *Exhaust Gas Temperature Measurements in Diagnostics of Turbocharged Marine Internal Combustion Engines. Part II. Dynamic Measurements*, *Polish Maritime Research*, nr 23/1(89), Gdańsk, s. 68–76.
- Korczewski, Z., 2017, *Diagnostyka eksploatacyjna okrętowych silników spalinowych – tłokowych i turbinowych. Wybrane zagadnienia*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.
- 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, Zawiercie*.
- 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*, vol. 162, no. 3, Poznań, s. 300–306.
- Korczewski, Z., Zacharewicz, M., 2007, *Diagnostyka symulacyjna układu turbodoładowania okrętowego tłokowego silnika spalinowego*, *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, nr 2(169).
- Korzeń, A., Taler, D., 2015, *Modeling of Transient Response of a Plate Fin and Tube Heat Exchanger*, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 92, New York, s. 188–198.
- Li, Y., Zhang, Z., Hao, X., 2018, *Blind System Identification of Two-Thermocouple Sensor Based on Cross-Relation Method*, *Review of Scientific Instruments*, vol. 89, 034901, College Park.
- Marszałkowski, K., Puzdrowska, P., 2015, *A Laboratory Stand for the Analysis of Dynamic Properties of Thermocouples*, *Journal of Polish CIMEEAC*, nr 10/1, Gdańsk, s. 111–120.
- Olczyk, A., 2007, *Koncepcja pomiaru szybkozmiennej temperatury gazu z uwzględnieniem dynamicznej składowej temperatury*, *Kongres Metrologii „Metrologia – narzędzie poznania i droga rozwoju”*, Kraków, *Pomiary Automatyka Kontrola*, nr 53 Bis/9, s. 576–579.
- Pawlak, W., 1995, *Usuwanie inercyjności pomiarowej z zapisu temperatury gazów wylotowych silnika odrzutowego w celu określenia niskocyklowego zmęczenia jego części gorącej*, *Informator Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych*, nr 392/95, III Krajowa Konferencja, Szczyrk.
- Pollock, D., 1991, *Thermocouples*, Routledge, New York.

- 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, nr 11/1, Gdańsk, s. 157–167.
- Urbanek, P., Kucharski, J., Olczyk, A., 2007, *Algorytm identyfikacji własności dynamicznych czujników temperatury metodą korekcji dwutorowej*, Automatyka, Wydawnictwo AGH, Kraków.
- Wawszczak, A., Gębarowski, T., 2013, *Właściwości dynamiczne czujników temperatury. Instrukcja do ćwiczenia laboratoryjnego*, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, Łódź.
- Wiśniewski, S., 1983, *Pomiary temperatury w badaniach silników i urządzeń cieplnych*, WNT, Warszawa.
- www.termo-precyzja.com.pl (dostęp: 10.04.2017).
- Zacharewicz, M., 2009, *Metoda diagnozowania przestrzeni roboczych silnika okrętowego na podstawie parametrów procesów gazodynamicznych w kanale zasilającym turbosprężarkę*, rozprawa doktorska, Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni, Gdynia.