

BADANIA SYMULACYJNE PROCESÓW GAZODYNAMICZNYCH W SILNIKU OKRĘTOWYM Z TURBODOŁADOWANIEM

Zbigniew KORCZEWSKI, Marcin ZACHAREWICZ

Akademia Marynarki Wojennej, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów
 ul. inż. Jana Śmidowicza 69, 81-103 Gdynia, M.Zacharewicz@amw.gdynia.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono możliwości modelowania procesów gazodynamicznych w kanałach spalin wylotowych dla potrzeb diagnozowania okrętowych tłokowych silników spalinowych. Opisano metodykę budowania modelu matematycznego oraz schemat realizacji badań. Opracowano model fizyczny procesów gazodynamicznych zachodzących w kanale łączącym silnik z turbiną turbosprężarki i przedstawiono ogólny opis modelu matematycznego. W dalszej części znajdują się reprezentatywne wyniki badań symulacyjnych zrealizowanych na bazie opracowanego modelu matematycznego. Umożliwiają one wyznaczenie zbioru relacji diagnostycznych defekt-symptom, przechowywanych w komputerowej bazie danych.

Słowa kluczowe: diagnostyka, silniki tłokowe, turbodoładowanie, modelowanie.

THE APPLICATION OF THE MATHEMATIC MODEL OF MARINE ENGINE EXHAUST PIPE FOR SIMULATE TESTING OF A GAS DYNAMICZAL PROCESS

Summary

There have been presented some possibilities concerning gasdynamical process as an object of mathematical modeling in the paper. The main aim of modeling is to create simulation model enabling the user to evaluate technical shape of a main diesel engine in operation. In order to achieve assumed purposes there have been elaborated a physical model of the considered gasdynamical process, the adequate mathematical model and it's solution as time courses of the total pressure and temperature assigned in the control sections within the channel connecting cylinders and turbocharger.

Keywords: diagnostics, marine engine, turbocharging, modeling.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

PARAMETRY

- i - entalpia właściwa,
- m - masa,
- M - moment obrotowy,
-
- \dot{m} - masowe natężenie przepływu,
- p - ciśnienie,
- T - temperatura,
- u - energia właściwa,
- v - prędkość liniowa,
- x - współrzędna przekroju kontrolnego,
- ω - prędkość kątowna,

SKRÓTY I INDEKSY

- CH - chłodnica,
- S - sprężarka,
- T - turbina,
- 1,2,3 - dotyczy numeru cylindra,
- k - dotyczy przekrojów kontrolnych-pomiarowych,
- s - dotyczy spalin,
- T - dotyczy turbiny,

- * - dotyczy parametrów spiętrzenia,
- 1-1,1-2,1-3 - dotyczy przekrojów kontrolnych spalin odpowiednio: na wyjściu z 1,2 i 3 kanału zasilającego.

1. WPROWADZENIE

Zagadnienie oceny stanu technicznego oraz prognozowania czasu poprawnego funkcjonowania silników okrętowych jest procesem złożonym, szczególnie gdy urządzenia te są oddalone od podstawowej bazy naprawczej.

Tematem podejmowanym w niniejszym artykule jest diagnozowanie okrętowych tłokowych silników spalinowych (OTSS) na podstawie badań symulacyjnych przebiegu procesów gazodynamicznych w układzie spalin wylotowych.

W założeniach budowanego systemu podstawą do wnioskowania diagnostycznego będą wyniki jednoczesnego pomiaru i rejestracji ciśnień w charakterystycznych przekrojach kontrolnych kanału spalin wylotowych okrętowego tłokowego silnika spalinowego (kanał łączący silnik z turbiną

turbosprężarki) oraz prędkości obrotowych wału korbowego silnika i wirnika turbosprężarki. Przewiduje się możliwość realizacji pomiarów w warunkach rzeczywistych eksploatacji silnika z wykorzystaniem rejestratorów wielkości szybkozmiennych, które zaprojektowano i zbudowano samodzielnie w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów (IKiEO) Akademii Marynarki Wojennej (AMW). Pomiary te umożliwią oszacowanie zmiany dysponowanej energii impulsów ciśnienia spalin zasilających turbosprężarkę. Stanowiąc one będą podstawę do oceny stanu technicznego elementów struktury konstrukcyjnej układu wymiany ładunku oraz komory spalania OTSS. Metoda ta zapełni lukę jaką jest diagnostyka silników tłokowych nie wyposażonych standartowo w zawory indykatorowe.

Z przeprowadzonej analizy literaturowej wynika, że zjawiskami gazodynamicznymi w kanałach spalin wylotowych zajmuje się wiele zespołów badawczych zarówno w kraju jak i za granicą. Sztandarowe publikacje opisujące prezentowane zagadnienia to: opracowania C. Kordzińskiego [7, 8, 9], A. Kowalewicz [10, 11] oraz W. Mitańca [12].

W projekcie badawczym nr 0 T00B 021 29 pt. „Metoda diagnozowania silników okrętowych wojennych o ograniczonej możliwości pomiaru ciśnień wewnątrzcyldrowych na podstawie wyników badania procesów gazodynamicznych w układzie turbodoładowania” realizowanym w AMW proponuje się oryginalne uzupełnienie stosowanych procedur diagnostycznych o kontrolę podstawowych układów funkcjonalnych silnika (układ cylinder – tłok, układ turbodoładowania, układ paliwowy oraz układ rozrządu), gdy konieczna jest ocena stanu technicznego, a nie ma możliwości indykowania cylindrów. Jednym z podstawowych etapów pracy badawczej jest opracowanie modelu matematycznego procesów gazodynamicznych w kanale spalin wylotowych okrętowego tłokowego silnika spalającego z turbodoładowaniem [3, 4, 14].

2. METODYKA BADAŃ

W wyniku przeprowadzonej przez autorów opracowania analizy podstaw teoretycznych zagadnienia modelowania procesów gazodynamicznych w kanałach wylotu spalin silników z turbodoładowaniem oraz w oparciu o doświadczenia zdobyte w czasie eksploatacji okrętowych silników tłokowych podjęto próbę opracowania modelu matematycznego procesów gazodynamicznych zachodzących w kanale wylotu spalin do wyznaczenia kryteriów oceny stanu technicznego jego: układu cylinder – tłok, układu turbodoładowania, układu paliwowego oraz układu rozrządu. Tak zdefiniowany problem badawczy wymusza konieczność zbudowania symulacyjnego modelu diagnostycznego, który umożliwi:

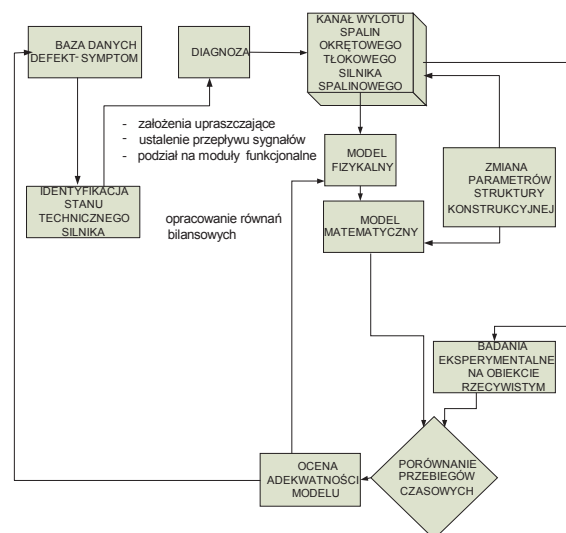
- identyfikację procesów gazodynamicznych w kanałach spalin wylotowych OTSS,

- identyfikację symptomów zaistniałych uszkodzeń oraz zmian regulacyjnych w obszarze cylinder-turbosprężarka.

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych opracowana zostanie metodyka diagnozowania rozpatrywanych silników okrętowych, która uwzględni następujące elementy proceduralne:

- co i gdzie mierzyć?,
- jak i kiedy mierzyć?,
- jak wnioskować?,
- czy silnik jest uszkodzony pierwotnie tzn. „tylko” zanieczyszczony lub rozregulowany, czy też nastąpiło już jego uszkodzenie wtórne, będące skutkiem zanieczyszczenia lub rozregulowania?,
- jaką „terapię” zastosować, w sensie podjęcia skutecznej decyzji eksploatacyjnej odnośnie zakresu działań obsługowych, ewentualnie decyzji operacyjnej odnośnie dalszego użytkowania silnika,
- jak często należy powtarzać badania diagnostyczne, aby zapewnić wymaganą trwałość, niezawodność i ekonomiczność pracy silnika?,
- który z wybranych parametrów diagnostycznych jest najbardziej przydatny w eksploatacji, tzn. wnosi największą ilość informacji diagnostycznej, przy jednocześnie łatwym jego pomiarze.

Podjęty temat realizowany jest etapami według schematu przedstawionego na rys. 1.



Rys. 1. Schemat realizacji badań procesów gazodynamicznych dla celów diagnostyki OTSS

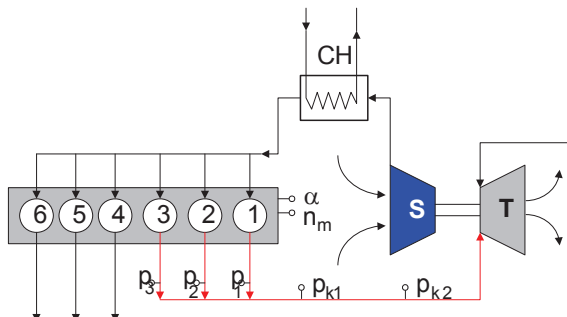
Na obecnym etapie badań opracowano model fizyczny rozpatrywanych procesów gazodynamicznych oraz bazujący na nim model matematyczny [4, 14]. W dalszym etapie pracy przewiduje się realizację pomiarów na obiekcie rzeczywistym, co pozwoli na przeprowadzenie weryfikacji opracowanego modelu matematycznego

oraz na ocenę jego adekwatności. Model ten umożliwi realizację eksperymentów symulacyjnych stanów niezdatności w układach: cylinder – tłok, turbodoładowania, paliwowym oraz rozrządu, dając w rezultacie możliwość stworzenia bazy danych uszkodzenie-symptom, na podstawie której możliwa będzie diagnostyka OTSS nie wyposażonych w zawory indykatorowe [1, 2, 4].

3. OBIEKT BADAŃ

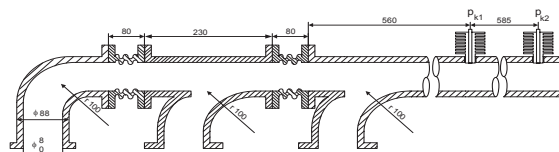
Przedmiotem modelowania są procesy gazodynamiczne mające miejsce w kanale spalin wylotowych okrętowego tłokowego silnika spalinowego z turbodoładowaniem. Obiektem rzeczywistym, który pozwoli na weryfikację opracowanego modelu matematycznego będzie silnik okrętowy SULZER typu 6AL 20/24 zainstalowany na stanowisku laboratoryjnym IKiEO AMW. Jest on średnioobrotowym, 6 cylindrowym, czterosuwowym silnikiem okrętowym z turbodoładowaniem.

W skład modelowanego układu silnik - turbosprężarka wchodzi następujące podzespoły: zespół wirnikowy turbosprężarki z turbiną T i sprężarką S, kanały przepływowe spalin i powietrza, chłodnica powietrza doładowującego CH. Schemat układu przepływowego silnika z zaznaczonymi miejscami pomiarów obserwowanych symptomów przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Schemat układu przepływowego silnika z zaznaczonymi miejscami pomiarów obserwowanych parametrów

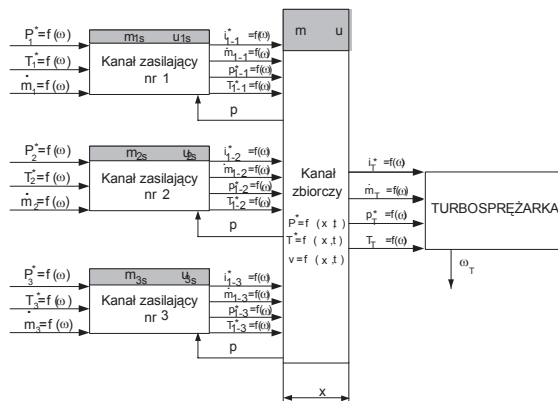
W zaprezentowanym układzie cylindry nr 1, 2 i 3 wciągają spaliny do jednego kanału wylotowego (zbiorczego), natomiast cylindry nr 4, 5 i 6 zasilają drugi kanał zbiorczy. Oba kanały spalin wylotowych zasilają turbinę turbosprężarki. Ponadto na schemacie przedstawiono jednokanałowy układ zasilania silnika powietrzem. Zarówno w kanale powietrza doładowującego jak i spalin wylotowych przepływ ma charakter pulsacyjny. Na rys. 2 zaznaczono dodatkowo przekroje kontrolne p_{k1} oraz p_{k2} , w których zainstalowane są czujniki ciśnienia. Przekrój poprzeczny kanału spalin wylotowych silnika przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Przekrój poprzeczny kanału spalin wylotowych silnika.

4. MODEL FIZYKALNY

Opracowanie modelu matematycznego [4, 14] (zgodnie ze schematem realizacji badań procesów gazodynamicznych przedstawionym na rys. 1) poprzedzone zostało zdefiniowaniem modelu fizycznego [14], stanowiącego teoretyczne ujęcie procesów realizowanych w obiekcie rzeczywistym. Opracowany model fizyczny procesów gazodynamicznych w kanale spalin wylotowych przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Model fizyczny procesów gazodynamicznych w kanale spalin wylotowych

W modelu fizycznym przyjęto następujące parametry wejściowe:

- ciśnienia i temperatury czynnika termodynamicznego na wyjściu z cylindrów silnika,
- strumienie mas czynnika termodynamicznego na wyjściu z poszczególnych cylindrów.

Zadane zmiany parametrów wejściowych jako funkcje kąta obrotu wału korbowego determinują pulsacyjny charakter pracy modelowanego układu.

Opracowany model fizyczny uwzględnia akumulację masy i energii przepływającego czynnika termodynamicznego w kanałach przepływowych. Natomiast pominięto procesy wymiany ciepła z otoczeniem. Dla dalszego zmniejszenia stopnia złożoności modelu matematycznego kanały zasilające 1, 2 i 3 rozpatrywane są jako obiekty zerowymiarowe, gdzie dla wszystkich parametrów stanu czynnika termodynamicznego zmienną niezależną jest kąt obrotu wału korbowego silnika.

Parametrami wyjściowymi dla kanałów zasilających są:

- ciśnienie i temperatura spalin,

- entalpie właściwe spalin,
- strumienie masy spalin.

Kanał zbiorczy rozpatrywany jest jako obiekt jednowymiarowy, w którym zmiennymi niezależnymi dla parametrów stanu czynnika termodynamicznego są:

- czas,
- odległość przekroju kontrolnego od wejścia do turbiny turbosprężarki.

W przekrojach kontrolnych p_{k1} i p_{k2} (rys. 2) wyznaczane są następujące parametry czynnika termodynamicznego:

- ciśnienie i temperatura spiętrzenia,
- prędkość przepływu spalin,

będące funkcją czasu oraz współrzędnej x przekroju kontrolnego kanału względem turbiny turbosprężarki [1, 4, 13, 14].

5. MODEL MATEMATYCZNY

Zgodnie z przyjętym schematem realizacji badań diagnostycznych silnika okrętowego (rys. 1) kolejnym etapem modelowania jest opracowanie modelu matematycznego procesów gazodynamicznych w kanale spalin wylotowych.

Szczegółowy opis równań bilansowych modelu matematycznego stanowi jeden z głównych elementów realizowanego projektu badawczego [14]. Natomiast jego obszernie fragmenty zawierają publikacje [4, 5, 6].

Ustalono, że wielkościami zadawanymi podczas eksperymentów symulacyjnych rozpatrywanych procesów gazodynamicznych są:

- przebieg zmian ciśnienia wewnątrz cylindrowego jako funkcji kąta obrotu wału korbowego,
- skład chemiczny paliwa,
- współczynnik nadmiaru powietrza,
- układ faz rozrządu.

Uwzględniono następujące parametry struktury konstrukcyjnej obiektu modelowania:

- objętość komory spalania,
- geometria układu cylinder-tłok (skok i średnica tłoka),
- geometria kanałów spalin wylotowych (długość kanału oraz jego średnica wewnętrzna),
- geometria układu korbowego (długość ramienia wykorbienia wału korbowego oraz długość korbowodu).

Wielkościami wyjściowymi z modelu matematycznego są parametry gazodynamiczne spalin w przekrojach kontrolnych p_{k1} , p_{k2} (rys. 2), w funkcji czasu:

- temperatura,
- ciśnienie,
- prędkość przepływu.

W celu maksymalnego przyspieszenia obliczeń przyjęto następujące założenia upraszczające:

- przemiany termodynamiczne zachodzące w modelowanym kanale przepływowym są traktowane jako przemiany izentropowe,
- paliwo spalane w cylindrach silnika składa się tylko z: węgla $c=86,63\%$ i wodoru $h=13,37\%$,
- procesy dynamiczne realizowane w kanale spalin wylotowych traktowane są jako ciąg chwilowych stanów ustalonych.

Podstawę opracowania modelu stanowią nieliniowe równania algebraiczne będące wynikiem bilansowania energetycznego poszczególnych elementów układu tzn.:

- kanałów zasilających zbiorczy kanał przepływowy do turbosprężarki,
- kanału zbiorczego zasilającego turbosprężarkę.

6. BADANIA SYMULACYJNE

Opracowany model matematyczny [4, 14] procesów gazodynamicznych w kanale spalin wylotowych OTSS umożliwia przeprowadzenie badań symulacyjnych parametrów czynnika termodynamicznego w kanale spalin wylotowych silnika tłokowego współpracującego z turbosprężarką. Pozwala on użytkownikowi na ingerencję w parametry struktury modelowanego obiektu, a przez to umożliwia symulowanie występowania znanych i rozpoznawalnych stanów niezdatności eksploatacyjnej układów cylindrowych oraz turbosprężarki.

Na rys. 5 przedstawiono przebiegi w funkcji czasu parametrów gazodynamicznych czynnika termodynamicznego przy niezmiennych parametrach struktury badanego układu (parametry struktury przyjęto zgodnie z dokumentacją techniczno-ruchową silnika SULZER typu 6AL 20/24), co odpowiada eksploatacji silnika w stanie pełnej zdatności technicznej. Na wykresach oznaczono cylindry, które wygenerowały poszczególne impulsy (cyl. 1, 2 i 3). Przebiegi parametrów stanu czynnika termodynamicznego w przekroju kontrolnym p_{k1} oznaczono jako 1, natomiast w przekroju kontrolnym p_{k2} jako 2.

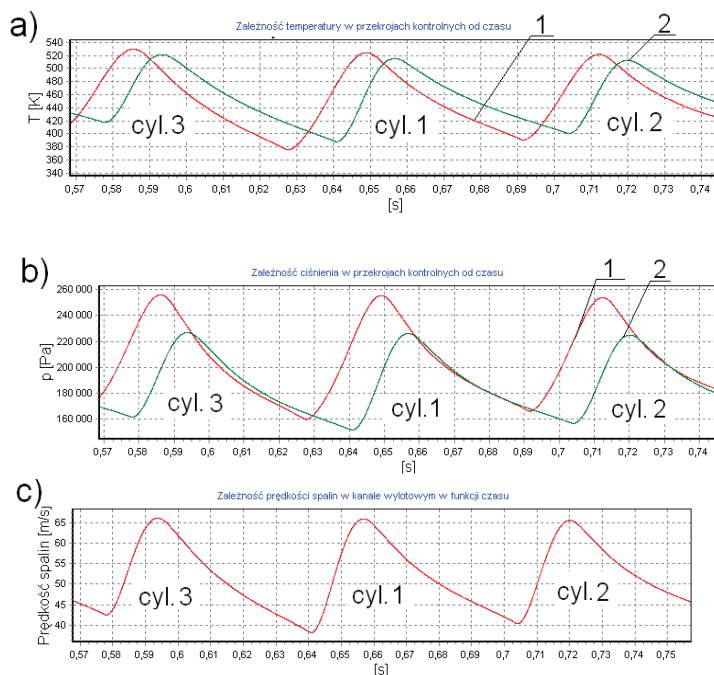
6.1. Przykładowa symulacja zmiany parametrów struktury obiektu modelowania

Opracowany model matematyczny procesów gazodynamicznych w kanale spalin wylotowych OTSS [4, 14] daje możliwość przeprowadzania symulacji numerycznej wpływu zmian parametrów struktury obiektu rzeczywistego na przebiegi parametrów stanu czynnika termodynamicznego w kanale łączącym silnik z turbiną turbosprężarki.

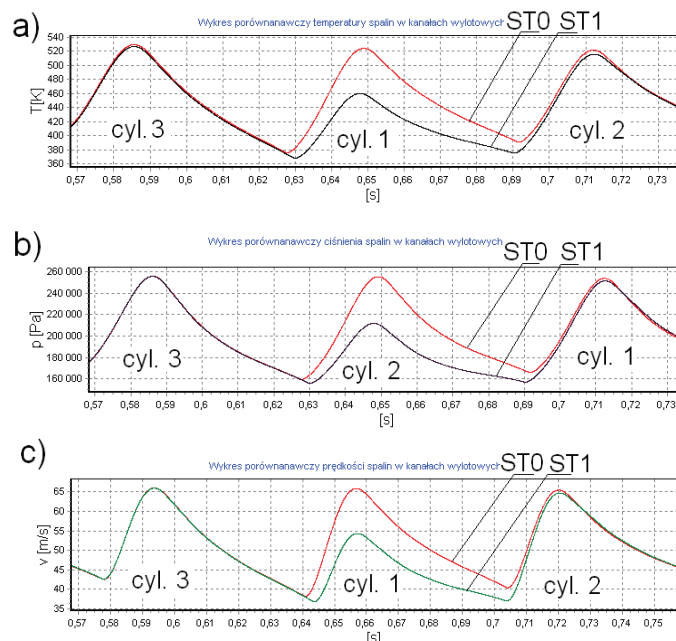
Jedną z możliwości modelu jest symulowanie wpływu zmian kątów otwarcia i zamknięcia zaworów wylotowych.

Przykładowe wyniki takich badań prezentuje rys. 6. Założono, że nastąpiło opóźnienie chwili otwarcia i zamknięcia zaworu wylotowego cylindra nr 1. Zmieniono w tym celu charakterystykę numeryczną układu faz rozrządu – zmiana kąta otwarcia i zamknięcia zaworów wylotowych o 10°OWK. Na zaprezentowanych rysunkach przedstawiono zestawienie przebiegów czasowych

parametrów czynnika termodynamicznego w przekroju kontrolnym p_{k1} kanału spalin wylotowych dla silnika bez wprowadzonych zmian struktury modelowanego obiektu (na rysunku oznaczone jako „ST0”) oraz po wprowadzeniu zmian struktury w układzie rozrządu modelowanego obiektu (na rysunku oznaczone jako „ST1”).



Rys. 5. Przebiegi parametrów stanu czynnika termodynamicznego w przekrojach kontrolnych p_{k1} i p_{k2} jako funkcji czasu (a – temperatury, b – ciśnienia, c – prędkości przepływu)



Rys. 6. Przebiegi parametrów stanu czynnika termodynamicznego w przekroju kontrolnym p_{k1} jako funkcja czasu (a – temperatury, b – ciśnienia, c – prędkości przepływu)

ST0 – stan techniczny wzorcowy (odniesieniowy)
ST1 – Stan techniczny po wprowadzeniu defektu

Z przebiegów tych wynika, że zmiany w układzie rozrządu spowodowały istotne zmiany parametrów opisujących przebiegi czasowe. Przykładowo amplituda ciśnienia, temperatury i prędkości spalin zmalała i nastąpiły przesunięcia czasowe ciśnienia i temperatury.

7. PODSUMOWANIE

Opracowany model matematyczny procesów gazodynamicznych zachodzących w kanałach spalin wylotowych OTSS [4, 14] stanowi element projektu badawczego nad metodyką badań diagnostycznych silników okrętowych nie wyposażonych standartowo w zawory indykatorowe. Daje możliwość symulowania szeregu stanów niezdatności silnika poprzez ingerencje w parametry struktury modelowanego obiektu np.:

- zanieczyszczenie komory spalania silnika tłokowego,
- zużycia zaworów cylindrowych,
- zużycie elementów współpracujących: krzywka wałka rozrządu trzon zaworu wylotowego,
- deformacja wałka rozrządu (skręcenie).

Wyniki realizowanych badań symulacyjnych stanowiąc będą podstawę do weryfikacji modelu matematycznego opracowanego dla celów diagnostycznych.

LITERATURA

- [1] Cannon R. H. Jr. *Dynamika układów fizycznych*. Wydawnictwa naukowo-Techniczne Warszawa 1973
- [2] Fuller E. J.: *The practical realisation of an automated diagnostic system for diesel powered vehicles*. SAE, paper No. 760838, 1976.
- [3] Korczewski Z., Zacharewicz M. *Animacja procesów gazodynamicznych w układzie turbodoładowania okrętowego silnika czterosurowego*. XXII Sympozjum Siłowni Okrętowych. Szczecin, 15-16.11.2001. s.141-146.
- [4] Korczewski Z.: *Diagnozowanie okrętowego silnika spalinowego na podstawie wyników badania procesów gazodynamicznych w układzie turbodoładowania*. Zeszyty Naukowe AMW, nr 3/2002 s. 67-77.
- [5] Korczewski Z.: *Metoda diagnozowania silników okrętowych z turbodoładowaniem na podstawie wyników badania procesów gazodynamicznych w układzie spalin wylotowych*. Diagnostyka, Vol. 28/2003.
- [6] Korczewski Z. *Zastosowanie analizy czasowej i widmowej do identyfikacji procesów gazodynamicznych w układzie spalin wylotowych silnika okrętowego z turbodoładowaniem*. 3rd International
- Congres on Technical Diagnostics, September 6-9 2004 Poznań
- [7] Kordziński C.: *Układy wylotowe szybkoobrotowych silników spalinowych*. Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 1964r
- [8] Kordziński C., Środulski T.: *Układy dolotowe silników spalinowych*. WKiŁ, Warszawa 1968.
- [9] Kordziński C., Środulski T.: *Silniki spalinowe z turbodoładowaniem*. WNT, Warszawa 1970.
- [10] Kowalewicz A.: *Systemy spalania szybkoobrotowych tłokowych silników spalinowych*. WKiŁ, Warszawa 1990.
- [11] Kowalewicz A.: *Doładowanie silników spalinowych*. Radom 1998.
- [12] Mitaniec W. Jaroszewski A.: *Modele matematyczne procesów fizycznych w silnikach spalinowych małej mocy. Część 1. Przedsiębiorstwo Konstrukcyjno-Badawcze „PRO-MO”* 1993.
- [13] Pudlik W.: *Termodynamika*. Politechnika Gdańska Gdańsk 1998
- [14] Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego *Metoda diagnozowania silników okrętów wojennych o ograniczonej możliwości pomiaru ciśnień wewnątrzcyldrowych na podstawie wyników badania procesów gazodynamicznych w układzie turbodoładowania*. nr 0 T00B 021 29.



Kmdr dr hab. inż. **Zbigniew KORCZEWSKI** jest prof. nadzwyczajnym Akademii Marynarki Wojennej. pełni funkcję Dziekana Wydziału Mechaniczno-Elektrycznego. W ramach działalności naukowej kieruje badaniami energetycznymi napędów

okrętowych. Specjalizuje się w diagnozowaniu silników spalinowych. Jest autorem ponad 100 publikacji przedstawianych na konferencjach naukowych w kraju i zagranicą.



Kmdr ppor. mgr inż. **Marcin ZACHAREWICZ** jest asystentem w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów. W ramach działalności naukowej zajmuje się badaniami modelowymi procesów gazodynamicznych w maszynach przepływowych.