

Zbigniew Korczewski
Marcin Zacharewicz
Akademia Marynarki Wojennej

ORGANIZACJA BADAŃ DIAGNOSTYCZNYCH OKRĘTOWEGO TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO O OGRANICZONEJ PODATNOŚCI KONTROLNEJ

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono założenia wstępne opracowywanej w Akademii Marynarki Wojennej metody diagnozowania przestrzeni roboczych okrętowych tłokowych silników spalinowych o ograniczonej podatności kontrolnej niewyposażonych standardowo w zawory indykatorowe. Sformułowano problem badawczy oraz główne cele prowadzonych badań. Zdefiniowano pojęcie przestrzeni roboczych silnika oraz dokonano analizy czynników mających wpływ na degradację ich struktury konstrukcyjnej. Przeprowadzono dyskusję nad stosowanymi obecnie strategiami eksploatacji silników okrętowych, tzn. eksploatacją według rezerwu godzinowego, stanu technicznego oraz poziomu niezawodności. Scharakteryzowano zależności istniejące pomiędzy poszczególnymi stanami obiektu diagnozowania — przestrzeniami roboczymi silnika okrętowego. Prowadzone w artykule rozważania przedstawione zostały na tle osiągnięć zagranicznych i krajowych ośrodków naukowo-badawczych zajmujących się podejmowanym projektem badawczym. Pozwoliło to na doprecyzowanie schematu realizacji badań procesów gazodynamicznych dla celów diagnostyki okrętowego tłokowego silnika spalinowego.

Słowa kluczowe:

diagnostyka, silniki okrętowe, doładowanie, kanały przepływowe.

WSTĘP

Jednym z istotnych problemów badawczych podejmowanych aktualnie w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów (IKiEO) Akademii Marynarki Wojennej (AMW) jest opracowanie metody diagnozowania przestrzeni roboczych okrętowych tłokowych silników spalinowych (OTSS) niewyposażonych standardowo w zawory indykatorowe.

Istota prowadzonych badań polega na określeniu relacji diagnostycznych pomiędzy parametrami stanu czynnika termodynamicznego w kanale spalin wylotowych a zmianami parametrów struktury konstrukcyjnej przestrzeni roboczych silnika. Autorzy szacują, że opracowywana metoda diagnostyczna pozwoli na zastosowanie wobec rozpatrywanych silników strategii eksploatacji według stanu technicznego. Oznacza to, że praktycznie wszystkie silniki stosowane na okrętach Marynarki Wojennej RP eksploatowane będą według stanu technicznego, co będzie stanowiło sukces ekonomiczny i organizacyjny — przy zapewnieniu przewidywalności dalszego użytkowania.

PRZYCZYNY POWSTAWANIA STANÓW NIEZDATNOŚCI W PRZESTRZENIACH ROBOCZYCH OKRĘTOWYCH TŁOKOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH

Na wszystkich okrętach Marynarki Wojennej Rzeczypospolitej Polskiej (MW RP) eksploatowane są tłokowe silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym¹. Zazwyczaj są to silniki średnio- i szybkoobrotowe, pracujące w pulsacyjnych układach turbodoładowania [17, 21]. Znajdują one zastosowanie jako podstawowy element okrętowego zespołu napędowego (silniki główne) oraz napęd mechanizmów pomocniczych (silniki pomocnicze).

W każdym silniku spalinowym zachodzi transformacja energii chemicznej zawartej w paliwie w energię cieplną, która następnie przekształcana jest w pracę mechaniczną. Wytwarzanie pracy mechanicznej oraz reakcje chemiczne spalania paliwa w cylindrach silników są powodem występowania wielu niepożądanych zjawisk mających wpływ na stan techniczny elementów struktury konstrukcyjnej silników, w szczególności ich przestrzeni roboczych. W procesie spalania zachodzą reakcje chemiczne, w których powstaje ciepło oraz spaliny. Spaliny są mieszaniną gazów, w której mogą występować stałe produkty spalania. Stałe produkty spalania tworzą trudno usuwalne osady zanieczyszczające przestrzenie robocze silnika. Obecność w przepływającym czynniku termodynamicznym twardych cząsteczek stałych (mineralnych stanowiących zanieczyszczenia powietrza zasilającego silnik lub sadzy powstającej w wyniku procesu spalania paliwa i oleju smarnego w cylindrach) jest przyczyną erozji powierzchni ograniczających przestrzenie robocze silników. Dodatkowo w wyniku reakcji spalania paliwa zawierającego związki siarki

¹ W dalszej części określane również krócej „silnikami”.

powstają bezwodniki kwasów: siarkowego i siarkawego. Związki te w kontakcie z wodą (zawartą w powietrzu lub będącą jednym z produktów spalania paliwa) tworzą kwasy powodujące korozję chemiczną [10, 14].

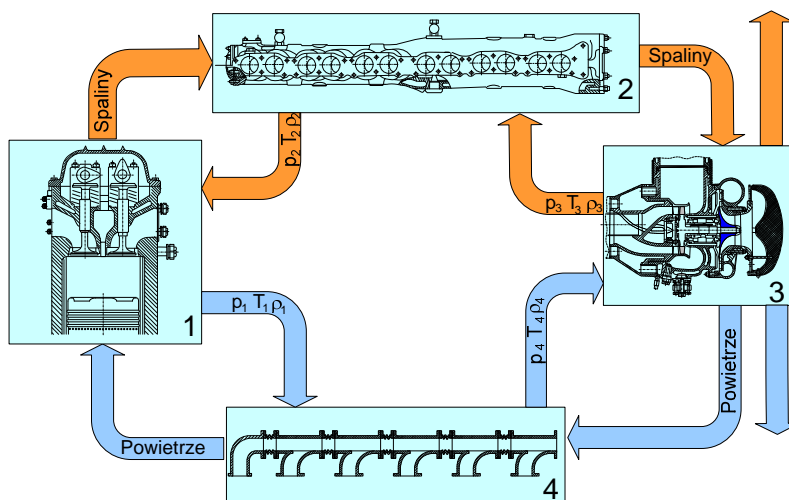
Inną przyczyną powstawania stanów niezdatności układów przepływowych silników okrętowych jest zjawisko zmęczenia materiału wynikające z cyklicznie zmiennych naprężeń, zarówno mechanicznych, jak i cieplnych [6, 10, 14].

Wszystkie wyszczególnione zjawiska i procesy zużyciowe prowadzą do degradacji struktury konstrukcyjnej przestrzeni roboczych silników.

Obiektami badań rozpatrywanymi w niniejszym artykule są przestrzenie robocze silnika utworzone przez:

- sekcje cylindrowe ograniczone tuleją cylindrową, tłokiem wraz z pierścieniami uszczelniającymi oraz dolną płytą głowicy wraz z zaworami i rozpylaczami wtryskiwaczy paliwa;
- kanały przepływowe powietrza i spalin łączące cylindry silnika z turbosprężarką;
- kanały międzyłopatkowe turbiny i sprężarki w zespole turbosprężarki.

Schemat przepływu czynnika termodynamicznego pomiędzy poszczególnymi przestrzeniami roboczymi silnika przedstawiono na rysunku 1. Uwzględniono w nim rodzaj i kierunek przepływającego czynnika oraz wzajemne sprzężenia gazodynamiczne współpracujących maszyn przepływowych: działających cyklicznie — cylindry silnika oraz działających w sposób ciągły — zespół wirnikowy turbosprężarki.



Rys. 1. Zależności pomiędzy przestrzeniami roboczymi w silniku:
 1 — sekcje cylindrowe, 2 — kanał wylotu spalin, 3 — turbosprężarka,
 4 — kanał powietrza zasilającego

Na podstawie przeprowadzonych badań niezawodnościowych silników okrętowych eksploatowanych w MW RP można wnioskować, że większość zaistniałych stanów niezdatności przestrzeni roboczych jest następstwem fizycznych lub fizykochemicznych zjawisk destrukcyjnych [10]. Najczęściej spotykane niesprawności i uszkodzenia występują w sekcjach cylindrowych. Są one konsekwencją osadzania się stałych produktów spalania na powierzchniach tulei, denkach tłoków oraz na głowicach cylindrów.

Stałe osady zanieczyszczające przestrzeń komory spalania powodują stopniowe zmniejszanie jej objętości (niejednakowe we wszystkich cylindrach), co skutkuje zakłóceniami funkcjonowania silnika (nierównomierność obciążeń układów cylindrowych). Z drugiej strony w eksploatacji silników znane są przypadki powiększania się objętości komory spalania na skutek wzrostu wartości luzów łożyskowych pomiędzy sworzniem tłokowym a głową korbowodu lub pomiędzy stopą korbowodu a wałem korbowym, co również prowadzi do wzrostu rozrzutu obciążeń cylindrowych wokół wartości średniej [12].

Zanieczyszczenie rowków pierścieni uszczelniających i ich zamków prowadzi do utraty szczelności układu tłok — pierścien — cylinder (TPC), której następstwem jest wyciek czynnika termodynamicznego z komory spalania do komory kadłuba silnika [10].

Innym newralgicznym elementem wchodzącym w skład przestrzeni roboczych silnika są zawory dolotowe i wylotowe sekcji cylindrowych (oraz jednocześnie kanały przepływowe powietrza i spalin). Najbardziej narażone na uszkodzenia są zawory wylotowe pracujące w najbardziej niekorzystnych warunkach (są one omywane aktywnymi chemicznie spalinami o temperaturze przekraczającej 1000 K). Prowadzi to do intensywnego zużycia ściernego i zmęczeniowego pary precyzyjnej: trzon zaworu — prowadnica. W skrajnych przypadkach w wyniku oddziaływania na trzon zaworowy sił i momentów gnących może dochodzić do „przekaszania” grzybka zaworu oraz nieszczelności gniazda i grzybka zaworowego, a w konsekwencji utraty szczelności komory spalania [10].

Kolejnym elementem przestrzeni roboczych silnika okrętowego narażonym na degradację struktury konstrukcyjnej w wyniku jego użytkowania w warunkach morskich jest kanał spalin wylotowych chłodzony wodą zaburtową (morską). Najczęstszą przyczyną niesprawności opisywanego kanału jest zanieczyszczanie jego wewnętrznych powierzchni stałymi produktami spalania. Powoduje to zmniejszenie czynnych przekrojów przepływu spalin przez kanał oraz zmniejszenie jego objętości. Dodatkowo kanał spalin wylotowych narażony jest na korozję chemiczną i naprężeniową oraz odkształcenia z racji na zróżnicowanie temperatury ścian [6].

Równie istotnymi elementami przestrzeni roboczych, z punktu widzenia niezawodnego funkcjonowania silników okrętowych, których uszkodzenia najczęściej występują w procesie eksploatacji, są kanały międzyłopatkowe turbosprężarki. Z jednej strony na powierzchni kanałów turbiny oddziałują substancje zawarte w spalinach, z drugiej zaś sprężarka narażona jest na zanieczyszczenia zasysane z powietrzem. Cząsteczki stałe przepływające przez kanały turbiny i sprężarki są przyczyną powstawania trudno usuwalnych osadów, które odkładając się na wieńcach łopatkowych turbiny i sprężarki, są powodem zwiększania ich mas oraz zmniejszenia prędkości obrotowej zespołu wirnikowego turbosprężarki. Następstwem tego procesu jest spadek sprężu i wydajności sprężarki oraz pogorszenie sprawności, zarówno turbiny, jak i sprężarki. W konsekwencji prowadzi to do zmniejszenia wartości współczynnika nadmiaru powietrza i pogorszenia jakości procesu spalania paliwa w cylindrach, objawiającego się wzrostem emisji stałych produktów spalania. Spada również zapas statecznej pracy sprężarki [10, 14].

Dodatkowo w wyniku zanieczyszczania wirników turbiny i sprężarki może dojść do utraty stabilności układu mechanicznego wirnika turbosprężarki i pojawienia się drgań rezonansowych powodujących przyspieszone zużycie węzłów łożyskowych, a także pęknięcia zmęczeniowego łopatek wirnikowych [6, 10].

Inną konsekwencją zanieczyszczeń powierzchniowych w kanałach międzyłopatkowych turbosprężarki jest zjawisko erozji, które prowadzi do wzrostu chropowatości powierzchni oraz zmiany geometrii i kształtu profili łopatkowych [10, 14].

STRATEGIE EKSPLOATACJI OKRĘTOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH

Występowanie zjawisk destrukcyjnych w przestrzeniach roboczych silników okrętowych jest procesem nieuniknionym i ciągłym, zawsze towarzyszącym ich eksploatacji w warunkach morskich. Z tego powodu jedynym sposobem zminimalizowania prawdopodobieństwa występowania uszkodzeń (zarówno pierwotnych, jak i wtórnych) jest poszukiwanie optymalnej strategii eksploatacyjnej, która zapewni maksymalne wydłużenie czasu niezawodnej pracy silnika przy wysokiej sprawności oraz dobrych osiągnięciach statycznych i dynamicznych. Taka strategia eksploatacji silników okrętowych powinna uwzględniać funkcjonowanie systemu diagnostycznego ukierunkowanego na odpowiednio wczesne wykrycie początkowych stadiów rozwoju stanów niesprawności eksploatacyjnej. Na podstawie sformułowanej diagnozy o stanie technicznym silnika podejmowane są następujące decyzje eksploatacyjne

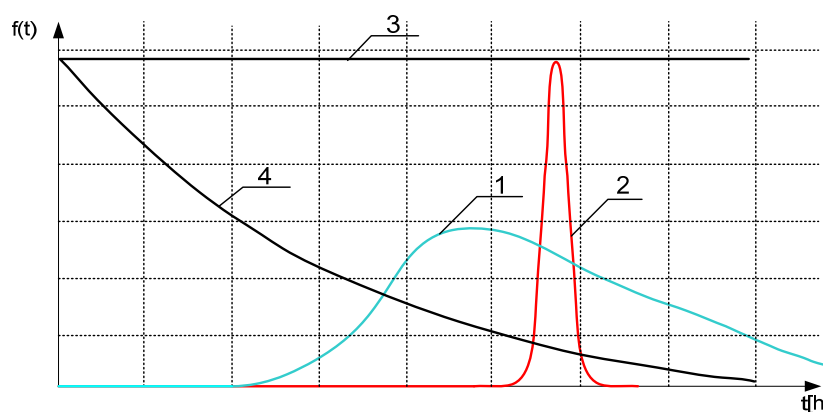
odnośnie dalszego użytkowania: praca bez ograniczeń, wprowadzenie ograniczeń obciążenia silnika, naprawa (wymiana lub regeneracja elementów konstrukcyjnych) lub czyszczenie przestrzeni roboczych. Wczesne wykrycie stanów niesprawności oraz ich usunięcie jest zazwyczaj tańsze niż późniejsza naprawa awaryjna. Dodatkowo precyzyjna i wczesna lokalizacja uszkodzeń w trakcie użytkowania pozwala skrócić czas trwania procesu odtwarzania stanu technicznego silnika (defektacja elementów konstrukcyjnych jest najbardziej czasochłonnym etapem procesu naprawczego) [8, 9].

Poszukiwania skutecznej strategii eksploatacji silników doprowadziły do powstania trzech odmiennych strategii eksploatacyjnych:

1. Strategii eksploatacji według ресурсu godzinowego. Zakłada ona wymianę poszczególnych części silnika po ściśle określonym czasie ich pracy, nazywanym rezurem. Strategia ta najlepiej sprawdza się w przypadku elementów silnika, które charakteryzują się wyraźną zależnością intensywności powstawania uszkodzeń od czasu ich pracy. Zależność owa powinna mieścić się w wąskim przedziale czasu. Dodatkowo elementy te charakteryzują się małą podatnością kontrolną, a zaprojektowanie i zbudowanie efektywnych metod diagnostycznych nie zawsze jest ekonomicznie uzasadnione. Typowy przebieg funkcji gęstości prawdopodobieństwa uszkodzeń tej grupy elementów silnika pokazano na rysunku 2. — krzywa 1. Zastosowanie strategii eksploatacji według ресурсu jest efektywne w przypadku tych elementów silnika, które narażone są na cyklicznie zmienne naprężenia prowadzące do zmęczenia materiału, na przykład w układach mechanicznych.
2. Strategii eksploatacji według stanu technicznego. Przewiduje ona okresową kontrolę zdadności podzespołów układów funkcjonalnych silnika objętych systemem diagnostycznym. Strategia ta sprawdza się w przypadku elementów konstrukcyjnych, dla których rozrzut rozwijających się wolno niesprawności (uszkodzeń) zawiera się w szerokim przedziale czasu ich pracy. Dodatkowo zastosowany system diagnozujący powinien zapewnić lokalizację miejsca powstawania uszkodzeń, precyzyjną ocenę trendu zmian stanu technicznego oraz możliwość określenia horyzontów prognozy czasu poprawnej pracy silnika i terminu realizacji następnego badania diagnostycznego. Tak zdefiniowana strategia eksploatacji prowadzi do zwiększenia średniego czasu pracy silnika bez uszkodzeń, co powoduje obniżenie kosztów eksploatacji, chociaż dopuszcza jego krótkotrwałą pracę przy nieznacznie obniżonej sprawności energetycznej. Typowy przebieg funkcji gęstości prawdopodobieństwa uszkodzeń elementów konstrukcyjnych układów funkcjonalnych silnika, które mogą być objęte strategią

eksploatacji wg stanu technicznego, pokazano na rysunku 2. — krzywa 2. Doświadczenia w eksploatacji silników okrętowych w MW RP wskazują na możliwość jej zastosowania w przypadku przestrzeni roboczych silnika narażonych na zanieczyszczanie, korozję lub erozję.

3. Strategii eksploatacji według poziomu niezawodności. Dotyczy ona tych układów funkcjonalnych silnika, dla których czas poprawnej pracy poszczególnych elementów konstrukcyjnych podlega rozkładowi wykładniczemu oraz gdy nie występuje zależność pomiędzy intensywnością występowania uszkodzeń i czasem pracy (intensywność uszkodzeń jest przypadkowa i nie zależy od czasu użytkowania). Elementy objęte tą strategią eksploatacji użytkuje się do wystąpienia uszkodzeń. Dopuszcza się zatem istnienie defektów, których konsekwencje nie stanowią istotnego zagrożenia dla poprawnego funkcjonowania oraz niezawodności silnika i mogą być szybko usunięte. Obsługi techniczne realizowane są w ostateczności, a potencjalnego uszkodzenia nie można zidentyfikować w wyniku czynności diagnostycznych. Typowy przebieg funkcji gęstości prawdopodobieństwa uszkodzeń tej grupy elementów układów funkcjonalnych silnika zaprezentowano na rysunku 2. — krzywe 3 i 4. Strategia według poziomu niezawodności jest skuteczna w eksploatacji podzespołów elektronicznych wchodzących w skład układów automatycznego sterowania silników.

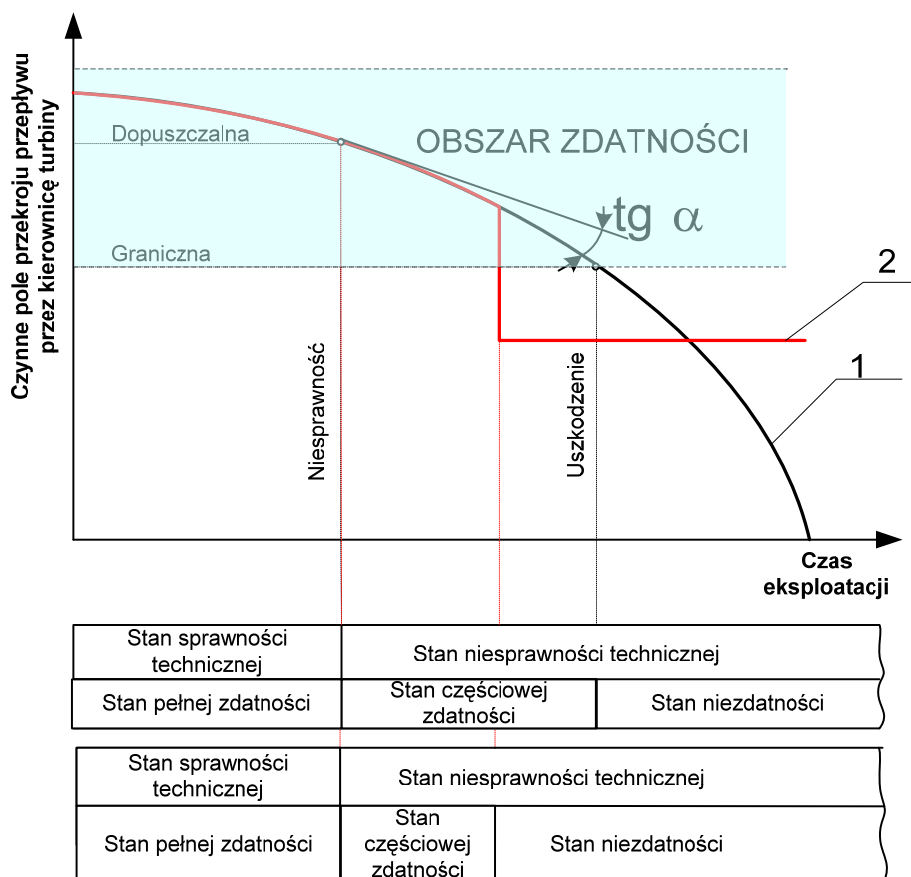


Rys. 2. Przebiegi funkcji gęstości prawdopodobieństwa czasu pracy do uszkodzenia elementów silników eksploatowanych według resursu, stanu technicznego i poziomu niezawodności:

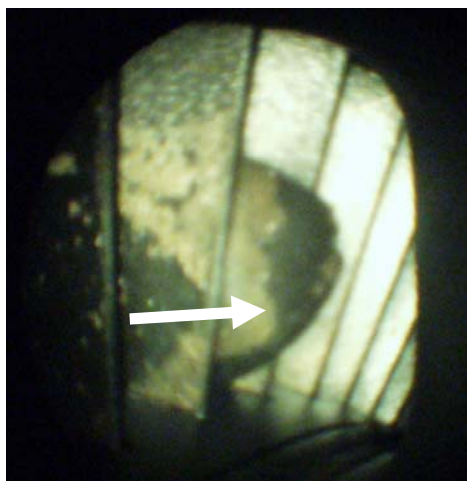
- 1 — eksploatacja wg stanu technicznego, 2 — eksploatacja wg resursu godzinowego,
3 i 4 — eksploatacja wg poziomu niezawodności

Kluczowym zagadnieniem diagnostycznym w ocenie stanu technicznego przestrzeni roboczych silnika okrętowego jest klasyfikacja stanów granicznych i ich

klas. Przykładowe zależności pomiędzy stanami sprawności i zdatności technicznej w aspekcie charakterystycznych zmian wartości parametru struktury konstrukcyjnej kanału spalin wylotowych przedstawia rysunek 3. Uwzględniono na nim dwie odmienne przyczyny zaistnienia uszkodzenia: naturalną oraz nagłą [20]. Hipotetyczny przebieg zmienności wartości parametru struktury, jakim jest przekrój czynny przepływu w kanale wylotu spalin dla zużycia naturalnego, jest typowy dla jego zanieczyszczenia — krzywa 1. Z kolei linia 2 odzwierciedla rzeczywiste zdarzenie zaistnienia uszkodzenia nagłego — skokowego spadku drożności kanału przepływowego spowodowanego obecnością fragmentu metalowego zakleszczzonego w kanałach międzyłopatkowych kierownicy turbiny (rys. 4.).



Rys. 3. Zależność pomiędzy charakterystycznymi stanami przestrzeni roboczych, dla których stan techniczny opisany jest przez jeden parametr struktury konstrukcyjnej — czynny przekrój przepływu kanału wylotu spalin: 1 — zużycie naturalne, 2 — uszkodzenie nagłe



Rys. 4. Fragmenty metalowe między łopatkami kierowniczymi turbiny turbosprężarki

Większość silników eksploatowanych na okrętach MW RP podlega eksploatacji według stanu technicznego. Badania diagnostyczne przestrzeni roboczych tych silników bazują na pomiarach ciśnienia wewnątrzcyldrowego realizowanych za pomocą specjalistycznych rejestratorów wyposażonych w przetworniki ciśnienia. Nierozwiązany do tej pory pozostaje problem oceny stanu technicznego silników, dla których nie ma możliwości prowadzenia pomiarów ciśnień wewnątrzcyldrowych. Ze względu na brak zaworów indykatorowych silniki te nie są objęte parametryczną kontrolą stanu technicznego przestrzeni roboczych. W stosunku do nich prowadzone są jedynie badania wziernikowe przy użyciu technik endoskopowych. Pozwalają one na wizualną ocenę stanu powierzchni ograniczających przestrzenie robocze, niestety ocenę subiektywną [10].

W ostatnich latach problem parametrycznej oceny stanu technicznego silników, w których nie ma możliwości indykowania cylindrów, stał się priorytetem dla zespołu diagnostycznego Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów Akademii Marynarki Wojennej [2, 13]. Wynika to z faktu wprowadzenia do eksploatacji okrętów wyposażonych w silniki o ograniczonej podatności diagnostycznej (brak zaworów indykatorowych). Przykładem takich silników są następujące konstrukcje:

- silniki główne typu M503 i M520 firmy ZWIEZDA zastosowane na okrętach projektu, odpowiednio: 205 i 660;
- silniki główne typu M401-A1 i A2 firmy ZWIEZDA zastosowane na okrętach projektu 607;
- silniki pomocnicze typu DDA 149 TI firmy DETROIT DIESEL zastosowane na fregatach klasy Oliver Hazard Perry.

Niska podatność kontrolna oraz powszechność stosowania wymienionych silników wskazuje na konieczność poszukiwania metod alternatywnych do indykowania, umożliwiających przeprowadzenie parametrycznej oceny stanu technicznego ich przestrzeni roboczych. Doświadczenia badawcze autorów niniejszego artykułu nabyte w czasie eksploatacji silników okrętowych, potwierdzone wynikami badań silników laboratoryjnych, wskazują, że obiecującą metodą diagnostyczną może być analiza przebiegów czasowych ciśnienia w kanałach wylotu spalin.

Zagadnienie diagnozowania silników o zapłonie samoczynnym na podstawie badania przebiegów zmienności ciśnienia w ich kanałach wylotowych jest oryginalne, gdyż dotychczas takie metody stosowane były tylko dla celów projektowania. W wyniku realizacji prac badawczych podejmowanych zarówno w kraju, jak i zagranicą powstało wiele rozwiązań konstrukcyjnych układów przepływowych rozpatrywanych silników, a zastosowane metody obliczeniowe mogą być pomocne w rozwiązaniu podejmowanego zagadnienia diagnostycznego.

1. Zagadnieniem modelowania dynamiki płynów w kanałach za pomocą metod numerycznych, takich jak metoda elementów brzegowych (MEB), zajmuje się zespół z Politechniki München w Niemczech: T. Dornseifer M. Grobel oraz T. Neunhoeffler [4].
2. Badania nad zagadnieniami obciążeń cieplnych silników były prowadzone przez zespół prof. S. Wiśniewskiego z Politechniki Łódzkiej. Wynikiem prac zespołu jest monografia [19], w której opisano proces wymiany ciepła w silnikach tłokowych oraz termodynamiczne ujęcie przebiegu procesu spalania paliwa w cylindrach silników.
3. Starsze publikacje zespołu C. Kordziński i T. Środulski [11] stanowią obszerne studium podstaw teoretycznych nad procesem wylotu spalin z cylindrów silników. Rozważania autorów są ukierunkowane na zagadnienia projektowe i dotyczą między innymi wpływu układu doładowania na charakterystyczne wskaźniki pracy silników, tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrach silników z turbodoładowaniem oraz procesu spalania paliwa w cylindrach. Obszerna część publikacji poświęcona jest zjawiskom gazodynamicznym zachodzącym w turbinie i w sprężarce turbosprężarki.
4. Zagadnieniem pracy silników spalinowych (zwłaszcza lotniczych i samochodowych) zajmował się zespół prof. S. Szczecińskiego z Wojskowej Akademii Technicznej, a później z Instytutu Lotnictwa w Warszawie. W publikacji [8] autor rozpatruje wpływ nastaw elementów regulacyjnych silników na ich charakterystyki oraz ekonomiczne wykorzystanie pojazdu samochodowego. Inną grupę silników będącą obiektem rozważań zespołu prof. S. Szczecińskiego są

lotnicze silniki tłokowe. W monografii [15] przedstawiono wybrane rozwiązania konstrukcyjne oraz zależności matematyczne modelu opisującego procesy ciepło-przepływowe, kinematykę i dynamikę układu korbowo-tłokowego, proponując algorytm obliczeniowy czynnego przekroju przepływu czynnika termodynamicznego w zaworach cylindrowych, który zostanie wykorzystany w dalszych badaniach autorów niniejszego artykułu.

Wiele dostępnych publikacji z zakresu diagnostyki silników okrętowych powstało w wyniku prowadzonych prac badawczych silników samochodowych, stanowiących najliczniejszą grupę wśród silników tłokowych eksploatowanych na świecie. Większość dostępnych opracowań, których autorzy opisują metody oceny stanu technicznego silnika samochodowego, ukierunkowana jest na elementy konstrukcyjne mające najistotniejszy wpływ na sprawność i osiągi silnika oraz intensywność emisji szkodliwych związków w spalinach [7]. Zagadnieniem diagnozowania silników innego przeznaczenia, w tym okrętowych, zajmują się tylko nieliczne zespoły badawcze.

Problematyka diagnozowania poszczególnych węzłów konstrukcyjnych silników o ZS rozpatrywana była również w innych publikacjach [2, 3, 6, 10, 13, 16, 18].

SFORMUŁOWANIE PROBLEMU BADAWCZEGO

Na podstawie przeprowadzonej analizy dostępnej literatury specjalistycznej, rezultatów badań własnych autorów opracowania oraz wyników badań diagnostycznych prowadzonych przez wiodące ośrodki w kraju i zagranicą zajmujące się szeroko rozumianą diagnostyką tłokowych silników spalinowych sformułowano następujący problem badawczy:

Jak prowadzić badania diagnostyczne mające na celu ocenę stanu technicznego przestrzeni roboczych silników okrętowych niewyposażonych standardowo w zawory indykatorowe w bieżącej eksploatacji?

Ponieważ bezpośrednia ilościowa i jakościowa ocena przebiegu procesów wewnątrzcyldrowych silników okrętowych niewyposażonych w zawory indykatorowe nie jest możliwa, problem badań diagnostycznych ich przestrzeni roboczych stał się istotnym problemem eksploatacyjnym. Wynika to z faktu wprowadzenia do eksploatacji w MW RP okrętów wyposażonych w takie właśnie silniki. W świetle prowadzonych analiz możliwości diagnozowania przedmiotowych silników sformułowano następującą tezę:

Zmiany stanu technicznego przestrzeni roboczych silnika wywołują deformację przebiegu fali ciśnienia spalin w kanale zasilającym turbinę turbosprężarki, determinując strumień energii spalin przed turbiną, a tym samym moc turbiny, wydajność sprężarki doładowującej i w konsekwencji osiągi oraz sprawność silnika.

Istnieje zatem możliwość wyodrębnienia ze zbioru parametrów gazodynamicznych charakteryzujących pulsacyjny przepływ spalin opuszczających cylindry silnika adekwatnych parametrów diagnostycznych, które jednoznacznie identyfikują te zmiany.

GŁÓWNE CELE PROWADZONYCH BADAŃ

Głównym celem jest opracowanie metody diagnozowania przestrzeni roboczych silników na podstawie pomiarów ciśnienia spalin w kanałach łączących cylindry silnika z turbiną turbosprężarki. Opracowanie metodyki badań diagnostycznych pozwoli na:

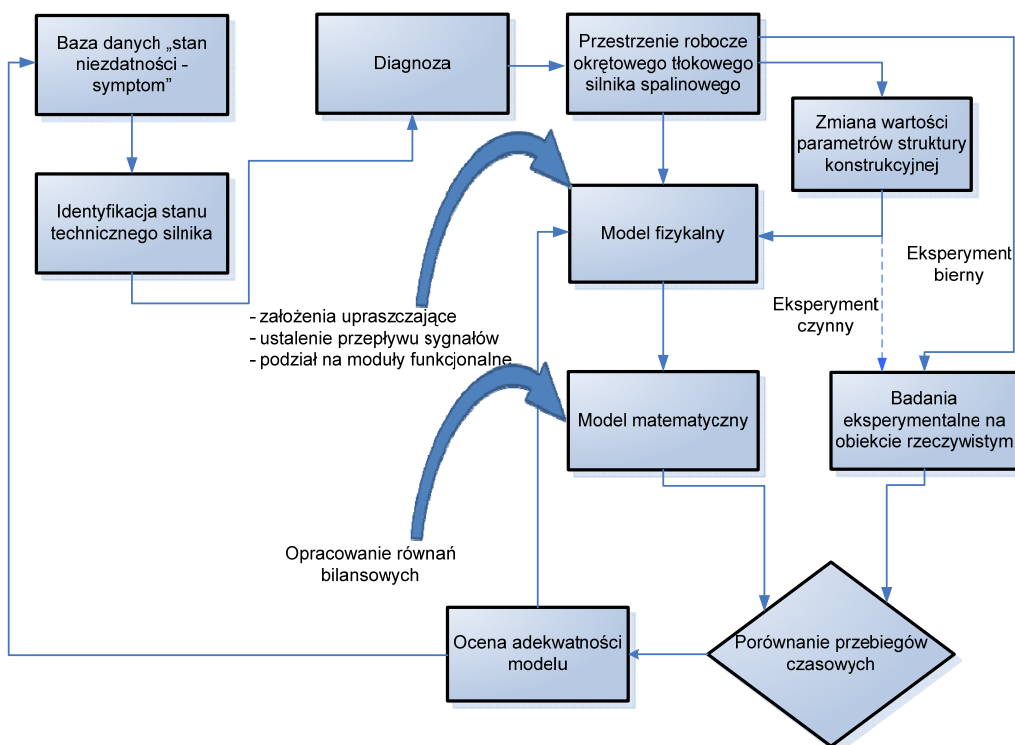
- ocenę nierównomierności obciążenia poszczególnych układów cylindrowych;
- identyfikację cylindrów, w których proces roboczy w znaczący sposób odbiega od pozostałych układów cylindrowych;
- identyfikację stanów niezdatności eksploatacyjnej elementów układów funkcjonalnych silnika mających wpływ na przebieg procesu spalania paliwa w cylindrach.

METODYKA REALIZACJI BADAŃ

Rozpatrywanie zjawisk gazodynamicznych w kanałach spalin wylotowych okrętowych tłokowych silników spalinowych wymaga opracowania schematu realizacji badań. Zawiera on klasyczne (według Cannona) ujęcie badań procesów gazodynamicznych w silnikach, jak model fizyczny, model matematyczny czy eksperymenty symulacyjne na obiekcie rzeczywistym i opracowanym modelu matematycznym. Jednak rozszerzenie schematu o elementy diagnozowania, tj. zmiana wartości parametrów struktury konstrukcyjnej modelowanego obiektu, daje nowe ujęcie zagadnienia modelowania matematycznego procesów nazwane diagnostyką symulacyjną. Przyjęty schemat realizacji badań pokazano na rysunku 5.

Zgodnie z przedstawionym algorytmem postępowania, równolegle z opracowywaniem modelu matematycznego wykonywane są badania na obiektach rzeczywistych. W wyniku przeprowadzonych pomiarów uzyskuje się przebiegi czasowe

obserwowanych parametrów gazodynamicznych. W trakcie realizacji badań na silniku laboratoryjnym SULZER typu 6AL20/24 przewidziano możliwość modyfikowania struktury konstrukcyjnej jego przestrzeni roboczych. Natomiast w przypadku silników ZWIEZDA typu M401 i DETROIT DIESEL typu DDA149TI założono prowadzenie eksperymentu biernego na dużej populacji eksploatowanych silników. Konieczność zastosowania eksperymentu biernego wynika z braku możliwości wprowadzania zmian w strukturze konstrukcyjnej przestrzeni roboczych silników w bieżącej eksploatacji.



Rys. 5. Schemat realizacji badań procesów gazodynamicznych dla celów diagnostyki OTSS

PODSUMOWANIE

Rozważania przedstawione w artykule stanowią wstęp do opracowania metody diagnozowania przestrzeni roboczych silników okrętowych o niskiej podatności kontrolnej wynikającej z niewyposażenia ich w zawory indykatorowe. Brak możliwości

indykowania cylindrów wyklucza możliwość dokonania ilościowej i jakościowej analizy porównawczej przebiegów zmienności ciśnień wewnątrzcyldrowych i na tej podstawie określenia stanu technicznego przestrzeni roboczych silników w procesie eksploatacji.

W wyniku analizy dostępnej literatury specjalistycznej oraz przeprowadzonych badań wstępnych sformułowano cele oraz podstawowe założenia metodyki badania procesów gazodynamicznych realizowanych w przestrzeniach roboczych silnika okrętowego dla potrzeb diagnostycznych.

Oczekuje się, że opracowana metodyka badań diagnostycznych umożliwi objęcie przedmiotowych silników strategią eksploatacji według stanu technicznego, co przyczyni się do zwiększenia ich niezawodności i trwałości oraz obniżenia kosztów użytkowania.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Balicki W., Szczeciński S., *Diagnozowanie lotniczych silników turbinowych*, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2001.
- [2] Bruski S., *Zastosowanie metod analizy częstotliwościowej drgań skrętnych wału napędowego do identyfikacji stanu technicznego wtryskiwaczy paliwa średnioobrotowego silnika okrętowego w eksploatacji*, rozprawa doktorska, AMW Gdynia 2005.
- [3] Czajgucki Z., *Niezawodność spalinowych silowni okrętowych*, WM, Gdańsk 1984.
- [4] Dornseifer T., Grobel M., Neunhoeffler T., *Numerical simulation in fluid dynamics*, SIAM, Philadelphia 1981.
- [5] Dzierżanowski P., Łyżwiński M., Szczeciński S., *Silniki tłokowe*, WKŁ, Warszawa 1981.
- [6] Girtler J. i inni, *Identyfikacja stanu technicznego układów korbowo-tłokowych silników o zapłonie samoczynnym, ze szczególnym uwzględnieniem emisji akustycznej jako sygnału diagnostycznego*, opracowanie w ramach projektu badawczego MNiSW nr N504 043 31/3480.
- [7] Günther H., *Diagnozowanie silników wysokoprężnych*, WKŁ, Warszawa 2002.
- [8] Hebda M., Mazur T., Pelc H., *Teoria eksploatacji pojazdów*, WKŁ, Warszawa 1978.
- [9] Kluj S., *Diagnostyka urządzeń okrętowych*, WSM, Gdynia 2000.
- [10] Korczewski Z., *Endoskopia silników okrętowych*, AMW, Gdynia 2008.

- [11] Kordziński C., Środulski T., *Silniki spalinowe z turbodoładowaniem*, WKŁ, Warszawa 1970.
- [12] Lus T., *Historia jednej niesprawności silnika okrętowego 6TD48*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2006.
- [13] Łutowicz M., *Identyfikacja procesu sprężania okrętowego tłokowego silnika spalinowego dla potrzeb diagnostyki jego przestrzeni roboczych*, rozprawa doktorska, AMW, Gdynia 2006.
- [14] Piaseczny L., *Technologia naprawy okrętowych silników spalinowych*, WM, Gdańsk 1992.
- [15] Szczeciński S., *Lotnicze silniki tłokowe*, MON, Warszawa 1969.
- [16] Tomczak J. L., *Metodyka bezpośredniego określania położenia kątownego wału korbowego silnika okrętowego i jej wykorzystania w indykatorze elektronicznym*, rozprawa doktorska, PG, Gdańsk 2001.
- [17] Wajand J. A., Wajand, J. T., *Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe*, WNT, Warszawa 2005.
- [18] Wisłocki K., *Studium wykorzystania badań optycznych do analizy procesów wtrysku i spalania w silnikach o zapłonie samoczynnym*, WPP, Poznań 2004.
- [19] Wiśniewski S., *Obciążenia cieplne silników tłokowych*, WKŁ, Warszawa 1972.
- [20] Żółtowski B., Ćwik Z., *Leksykon diagnostyki technicznej*, ATR, Bydgoszcz 1996.
- [21] *Jane's Fighting Ships 2005–2006*, <http://jfs.janes.com>, GB 2005.

ORGANIZATION OF DIAGNOSTIC INVESTIGATIONS OF MARINE ENGINE OF LIMITED MONITORING SUSCEPTABILITY

ABSTRACT

The paper presents preliminary assumptions of the new diagnostic method concerning the marine diesel engine's workspace areas, which was developed at the Polish Naval Academy. It is expected that the method will be very useful to diagnose technical condition of marine diesel engines at limited monitoring susceptibility, i.e. the ones which are not equipped with indicator valves. It includes the research problem and main purposes of the research. The paper defines the notion of the workspace areas and does an analysis of factors that have the highest impact on

destruction phenomenon. The paper also considers strategies used at present to run marine diesel engines: according to the engine installation life, according to the technical shape as well as according to the level of reliability. It characterises mutual interdependences between characteristic technical conditions of the research object (workspace areas). The research conducted is shown at the background of achievements of foreign and national scientific centres. This way the research diagram of gas-dynamical processes was made more precise for diagnostic purposes of marine diesel engines.

Keywords:

diagnostics, marine engines, supercharging, flow channel.

Recenzent prof. dr hab. inż. Stefan Szczeciński