

## THE USE OF THE EXPERT SYSTEM IN DIAGNOSTIC OF MARINE DIESEL ENGINES

**Rafał Pawletko**

Gdynia Maritime University  
Morska 81-87, 81-225 Gdynia, Poland  
tel.: +48 58 6901305  
e-mail: pawletko@am.gdynia.pl

### *Abstract*

*In the paper the first stage of research relevant to the marine diesel engine diagnostic expert system is presented. The decomposition of diesel engine to diagnostic subsystems is described. Basic sources of knowledge which can be used for construction of knowledge data set are also identified.*

*The basic knowledge related to the marine diesel exploitation was undertaken. That expert knowledge covers the weakness point of engine, the kind of faults and diagnostic relation between faults and their symptoms. The group of experts was contained the experienced merchant navy officers. The paper questionnaire was used to the knowledge acquisition. Particularly the methodology of obtaining the representation way of the approximate knowledge, test results of the frequency of the damage occurring distinguished by experts' symptoms of damages, diagnosing of damages of fuel systems are presented in paper. However distinguished parameters by experts do not make possible location of damages. Special interesting seem here methods making possible automatic knowledge acquisition from databases.*

*The acquired knowledge will be verified on the laboratory engine in the future.*

**Keywords:** *technical diagnostic, expert systems, combustion engines, expert knowledge acquisition*

## WYKORZYSTANIE SYSTEMU EKSPERTOWEGO DO DIAGNOZOWANIA OKRĘTOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

### *Streszczenie*

*W artykule przedstawiono wyniki pierwszego etapu badań związanych z tworzeniem systemu ekspertowego do diagnozowania okrętowego silnika tłokowego. Scharakteryzowano dekompozycję silnika okrętowego na układy funkcjonalne oraz zidentyfikowano podstawowe źródła wiedzy ekspertowej, które mogą być wykorzystane podczas tworzenia bazy wiedzy.*

*Podjęto próbę pozyskania podstawowej wiedzy z dziedziny eksploatacji silników, dotyczącą najsłabszych ogniw silnika, rodzaju występujących uszkodzeń silników oraz podstawowych relacji diagnostycznych, umożliwiających ocenę stanu technicznego. Grupę ekspertów stanowili doświadczeni oficerowie mechanicy floty handlowej. Do pozyskiwania wiedzy od ekspertów zastosowano wywiad kwestionariuszowy. W szczególności metodologia pozyskiwania oraz sposób reprezentacji wiedzy przybliżonej, wyniki badań częstości występowania uszkodzeń wyodrębnione przez ekspertów symptomy uszkodzeń, diagnozowanie uszkodzeń układu paliwowego są prezentowane w artykule. Parametry wyodrębnione przez ekspertów nie umożliwiają jednak lokalizacji uszkodzeń. Szczególne interesujące wydają się tutaj metody umożliwiające automatyczne pozyskiwanie wiedzy z baz danych.*

*Uzyskane wyniki będą weryfikowane na stanowisku laboratoryjnym.*

**Słowa kluczowe:** *diagnostyka techniczna, systemy ekspertowe, silniki spalinowe, pozyskiwanie wiedzy ekspertowej*

### **1. Wstęp**

Znajomość stanu technicznego okrętowego silnika tłokowego jest konieczna do prowadzenia efektywnej strategii eksploatacji. Umożliwia ona planowanie niezbędnych czynności obsługowych i remontowych oraz zmniejsza ryzyko wystąpienia awarii.

Istnieje szereg metod oraz systemów oceny stanu technicznego silników okrętowych, rozwijanych zarówno przez ośrodki badawcze, jak i przez producentów silników. Główną wadą większości współczesnych rozwiązań systemów diagnozowania jest to, że są to systemy zamknięte. Modele procesów roboczych silnika oraz algorytmy oceny stanu technicznego zaimplementowane na etapie tworzenia systemu, nie mogą być modyfikowane w czasie późniejszej eksploatacji.

Alternatywą dla takiego stanu rzeczy może być opracowanie systemu ekspertowego wspomagającego diagnozowanie silników okrętowych. Modułowa struktura systemów ekspertowych, a przede wszystkim oddzielenie bazy wiedzy od reszty programu, umożliwia opracowywanie systemów otwartych, w których wiedza diagnostyczna może być w łatwy sposób uaktualniania i rozszerzana. Istotną zaletą tych systemów jest również możliwość reprezentacji wiedzy, pochodzącej z różnych źródeł.

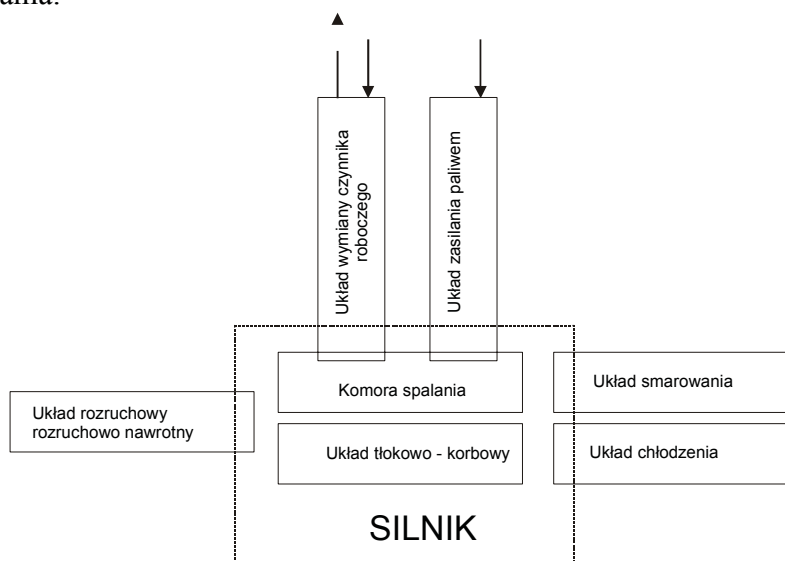
W sytuacji najbardziej ogólnej wiedza dla ekspertowego systemu diagnozowania silnika okrętowego może być pozyskana od ekspertów (specjalistów w dziedzinie eksploatacji) oraz z diagnostycznych baz danych.

W artykule przedstawiono pierwszy etap badań, związanych z tworzeniem systemu ekspertowego, do diagnozowania okrętowego silnika tłokowego. Badania obejmowały możliwości pozyskania wiedzy od specjalistów. Grupę ekspertów stanowili doświadczeni oficerowie mechanicy floty handlowej. Podjęto próbę pozyskania podstawowej wiedzy z dziedziny eksploatacji silników, dotyczącą najsłabszych ogniw silnika, rodzaju występujących uszkodzeń oraz podstawowych relacji diagnostycznych, umożliwiających ocenę stanu technicznego. Do pozyskiwania wiedzy od ekspertów zastosowano wywiad kwestionariuszowy.

## 2. Silnik okrętowy jako obiekt diagnostyki

Okrętowy silnik spalinowy jest złożonym obiektem technicznym, którego głównym zadaniem jest zamiana energii powstałej w wyniku spalania paliwa na moment obrotowy. Do celów diagnostycznych wygodny jest podział silnika na szereg układów – podsystemów, takich jak:

- układ tłokowo-korbowy,
- układ wymiany czynnika roboczego,
- układ zasilania paliwem,
- układ smarowy,
- układ chłodzenia,
- układ rozruchowo-nawrotny,
- komorę spalania.



Rys. 1. Podstawowe układy funkcjonalne silnika okrętowego  
Fig. 1. Basic subsystems of marine diesel engine

Dekompozycja silnika na poszczególne układy funkcjonalne pozwala opracowywać oraz rozwijać metody diagnozowania w odniesieniu do poszczególnych układów. Umożliwia wytypowanie układów, których uszkodzenia występują najczęściej i niosą najpoważniejsze w skutkach konsekwencje. Kolejną ważną zaletą dekompozycji silnika jest łatwiejsza organizacja procesu pozyskiwania oraz reprezentacji wiedzy. Pozyskiwanie można przeprowadzić, bowiem w blokach dotyczących poszczególnych układów, co w znacznym stopniu pozwala na uporządkowanie i usystematyzowanie wiedzy pozyskiwanej w wyniku wywiadów z ekspertami. Przedstawiony podział może być jednocześnie zastosowany w sposób bezpośredni do organizacji samej bazy wiedzy zgodnie z zasadami analizy obiektowej.

### **3. Możliwości pozyskiwania wiedzy dla potrzeb diagnostycznego systemu ekspertowego**

Jednym z najważniejszych etapów podczas tworzenia systemu ekspertowego jest poprawne określenie dziedziny, w której system będzie wykorzystywany, identyfikacja potencjalnych źródeł wiedzy oraz możliwości jej pozyskania. Wiedza diagnostyczna może być pozyskana od ekspertów lub z baz danych. W literaturze przedmiotu bardzo często podkreślany jest fakt, że eksperci powinni odgrywać niezwykle istotną rolę, szczególnie w początkowym etapie tworzenia diagnostycznego systemu ekspertowego.

W dotychczasowych pracach, obejmujących zagadnienia tworzenia systemów diagnozowania silników okrętowych, nie podejmowano jednak problemu wykorzystania wiedzy ekspertowej. Taki stan rzeczy wynika przede wszystkim ze specyfiki eksploatacji silników okrętowych. Pomimo podobieństwa konstrukcyjnego oraz funkcji, jakie te urządzenia spełniają na statkach, posiadają one szereg cech indywidualnych, które praktycznie uniemożliwiają opracowanie uniwersalnych metod i systemów diagnozowania. Podczas opracowywania takiego systemu, należy brać pod uwagę producenta silnika, jego typ, wyposażenie kontrolno-pomiarowe oraz rodzaj statku, na którym pracuje urządzenie. Podobny problem dotyczy potencjalnych ekspertów, których wiedza może być wykorzystana. Trudno jest bowiem wyłonić specjalistów, posiadających doświadczenie eksploatacyjne oraz wiedzę dostateczną do opracowania bazy wiedzy systemu diagnozowania określonego typu silnika. Przedstawione uwarunkowania oraz dodatkowo znaczne zróżnicowanie przebiegu eksploatacji silników, nawet tego samego typu, zamontowanych na podobnych statkach znacznie ograniczają możliwości wykorzystania wiedzy ekspertowej. Wydaje się jednak zasadne podjęcie próby pozyskania, tzw. uniwersalnej wiedzy umożliwiającej diagnozowanie silnika okrętowego, którą nabywają załogi maszynowe statków, w wyniku wieloletnich doświadczeń eksploatacyjnych. Wiedza ta, obejmuje najłagodniejsze ogniwa silnika, występujące uszkodzenia oraz podstawowe relacje, umożliwiające ocenę stanu silnika. Jest ona na tyle uniwersalna, że może wspomagać diagnostykę różnych typów silników.

W celu pozyskania wiedzy dla potrzeb diagnozowania okrętowych silników tłokowych, konieczna jest identyfikacja źródeł, z których mogą pochodzić eksperci. Można wyróżnić tutaj dwie przestrzenie działalności: wytwarzanie oraz eksploatacja. W obszarze wytwarzania eksperci są związani ściśle z firmami produkującymi silniki okrętowe. Badania związane z niezawodnością oraz diagnostyką silników są prowadzone przez producentów silników od wielu lat. Oferują oni obecnie wyspecjalizowane systemy diagnozowania [8]. Prowadzone są również statystyki uszkodzeń i awarii. Wytwórcy silników dysponują wysokiej klasy specjalistami, którzy posiadają szeroką wiedzę, związaną zarówno z eksploatacją, jak i diagnostyką silników. Podstawową barierą ograniczającą wykorzystanie ekspertów z obszaru wytwarzania jest szeroko pojęty interes największych producentów. Wiedza w dzisiejszym świecie jest wartością samą w sobie i stała się niezwykle cenna. Pojawia się zatem problem z jednej strony udostępnienia przez producentów specjalistów w celu przeprowadzenia badań ekspertowych, z drugiej zaś wykorzystania w ten sposób pozyskanej wiedzy w systemie diagnostycznym.

Drugim źródłem ekspertów dla potrzeb budowy diagnostycznego systemu ekspertowego silników okrętowych, obok producentów, jest obszar eksploatacji. Wyróżnikiem specjalistów

pochodzących z tego obszaru jest z całą pewnością brak, głębokiej specjalizacji w określonych typach silników. Specyfika pracy załóg maszynowych statków handlowych, narzuca bardzo częste zmiany miejsca pracy. Nie spotyka się praktycznie sytuacji, w której mechanik w czasie swojej praktyki zawodowej ma do czynienia tylko z kilkoma statkami. Zazwyczaj doświadczenie zawodowe obejmuje kilkanaście lub kilkadziesiąt jednostek bardzo zróżnicowanych technicznie w różnym wieku. W wyniku tego, doświadczony mechanik okrętowy dysponuje wiedzą uniwersalną, o dużym stopniu ogólności, pozyskaną w wyniku doświadczeń z wieloma urządzeniami różnego typu. Oczywiście istnieje niebezpieczeństwo, że wiedza w takiej sytuacji może być jedynie bardzo powierzchowna i często niepełna, dlatego należy do niej podchodzić z dużą ostrożnością. Niewątpliwą zaletą specjalistów z dziedziny eksploatacji siłowni okrętowych jest ich łatwa dostępność. Współczesne wymagania armatorów oraz Międzynarodowej Organizacji Morskiej narzucają konieczność rozszerzania oraz odnawiania certyfikatów potwierdzających kompetencje niezbędne do pracy na morzu. W rezultacie bardzo często trafiają oni na różnego rodzaju kursy w ośrodkach szkoleniowych, w których możliwe jest przeprowadzanie badań.

Głównym źródłem wiedzy dla proponowanego systemu diagnostycznego na etapie badań ekspertowych, wydają się być zatem załogi maszynowe statków handlowych. Przed realizacją badań konieczne było wstępne określenie warunków dla doboru ekspertów. W odniesieniu do załóg maszynowych istotne są dwa kryteria. Pierwsze kryterium powinno dotyczyć stażu pracy niezbędnego do zdobycia wiedzy eksploatacyjnej. Kryterium drugie powinno być związane z zajmowanym stanowiskiem, które jest ściśle związane z zakresem obowiązków, warunkujących zdobycie doświadczenia w obsłudze silnika głównego oraz silników pomocniczych. O ile nadzór nad eksploatacją silników pomocniczych, stanowiących napęd zespołów prądotwórczych może sprawować mechanik na stanowisku oficera wachtowego, tak za silnik główny jest odpowiedzialny dopiero drugi mechanik. Badania powinny zatem obejmować osoby przynajmniej posiadające staż na stanowisku drugiego mechanika. Wymagany okres pływania na stanowisku drugiego mechanika dla osób uczestniczących w kursie, wynosi obecnie 18 miesięcy co można uznać za minimalny okres pozwalający na zdobycie dostatecznej wiedzy eksploatacyjnej.

Pozyskiwanie wiedzy ekspertowej może być realizowane z udziałem inżyniera wiedzy oraz bez jego udziału. Wyeliminowanie inżyniera wiedzy wymaga zastosowania dedykowanych narzędzi programowych umożliwiających bezpośrednią edycję bazy wiedzy przez eksperta. Szczególnie w początkowym etapie tworzenia systemu ekspertowego nie jest to dobre rozwiązanie. Wymaga bowiem opracowania specjalnego oprogramowania, a dodatkowo pozbawia twórcę systemu, kontroli nad procesem pozyskiwania wiedzy oraz jakością pozyskanych informacji. Na początku lepszym rozwiązaniem wydaje się zatem, wykorzystanie inżyniera wiedzy, który może po pierwsze, zweryfikować wstępnie samych ekspertów oraz dokonać oceny poprawności przekazanej przez nich wiedzy.

Metodyka pozyskiwania wiedzy od specjalistów musi uwzględniać sposób jej reprezentacji w systemie ekspertowym. Z pośród wielu dostępnych obecnie metod reprezentacji wiedzy, zdecydowano się na zastosowanie reguł. Systemy regułowe okazały się szczególnie przydatne dla potrzeb diagnostyki technicznej i stanowią obecnie większość praktycznych aplikacji systemów ekspertowych [7]. Główną zaletą tej formy reprezentacji jest duża przejrzystość zapisu oraz łatwość interpretacji. Jest to szczególnie istotne zarówno na etapie wstępnego pozyskiwania wiedzy od ekspertów, jak i podczas jej weryfikacji.

W regułowych systemach ekspertowych zachodzi konieczność reprezentacji wiedzy niedokładnej i przybliżonej. Wynika to przede wszystkim z faktu, wykorzystywania subiektywnych opinii specjalistów oraz braku modeli opisujących jednoznacznie relacje między stanem urządzenia, a cechami obserwowanych sygnałów diagnostycznych. W związku z tym zachodzi konieczność określenia pewności samych reguł diagnostycznych, jak i poszczególnych stwierdzeń stanowiących przesłankę reguł. Najczęściej w tym celu wykorzystuje się różne

kategorie stopni pewności CF (ang. certainty factor lub confident factor), które pozwalają na określenie pewności poszczególnych stwierdzeń oraz całych reguł diagnostycznych [1, 7].

#### 4. Metodyka badań ekspertowych

Eksperci powinni odgrywać ważną rolę w procesie tworzenia systemu diagnostycznego. Podczas wieloletniej pracy zawodowej zdobywają oni wiedzę i doświadczenie niezbędne do prowadzenia eksploatacji silników okrętowych. Istotną częścią tej wiedzy jest umiejętność oceny stanu technicznego. Obejmuje ona podstawy fizyczne działania silnika spalinowego, uszkodzenia oraz ich symptomy.

Biorąc pod uwagę niekompletność oraz brak usystematyzowanej wiedzy związanej z diagnozowaniem silników okrętowych, podjęto próbę pozyskania tej wiedzy od specjalistów.

Do pozyskiwania wiedzy wykorzystano wywiad kwestionariuszowy [6]. Metoda ta polega na zbieraniu informacji za pomocą zestawu pytań, dotyczących określonych problemów badawczych. Pytania te są przedstawiane najczęściej w postaci drukowanego formularza [12].

Celem badań ekspertowych była weryfikacja częstości występowania uszkodzeń silników okrętowych, w odniesieniu do poszczególnych układów funkcjonalnych oraz próba wytypowania obserwowanych symptomów tych uszkodzeń wraz z określeniem wskaźników ich pewności. Pytania w kwestionariuszu obejmowały następujące zagadnienia:

- określenie częstości występowania uszkodzeń wyróżnionych układów funkcjonalnych silnika okrętowego,
- określenie częstości występowania uszkodzeń poszczególnych elementów układów funkcjonalnych,
- określenie objawów i przyczyn uszkodzeń.

Kwestionariusz przygotowano w formie tabeli, którą po wypełnieniu przez eksperta nazywano kartą reprezentacji wiedzy ekspertowej. Listę uszkodzeń przygotowano w oparciu o badania literaturowe [11, 13]. Pytania w ankiecie miały charakter otwarty, przewidziano również możliwość rozszerzania listy o nowe uszkodzenia zaproponowane przez eksperta.

Kryterium doboru osób biorących udział w badaniach ekspertowych było posiadanie stopnia morskiego przynajmniej II oficera mechanika oraz wymagany 18 miesięczny okres praktyki na tym stanowisku. Badania ekspertowe obejmowały grupę 23 oficerów mechaników floty handlowej, wśród których 10 osób posiadało dyplom starszego mechanika pozostali natomiast II oficera mechanika.

Wartości wskaźników pewności symptomów diagnostycznych (przesłanek reguł) ( $CF_s$ ) zostały wyznaczone na podstawie liczby ( $n_{oj, xi}$ ) wskazań j-tego objawu przez ekspertów przy i-tym stanie niezdatności, odniesioną do ogólnej liczby ekspertów biorących udział w badaniach ( $N_{oj}$ ) zgodnie ze zależnością (1):

$$CF_s = (X_i \rightarrow sd_i) = \frac{n_{oj, xi}}{N_{oj}}, \quad (1)$$

gdzie:

- $CF_s$  - wskaźnik pewności symptomu diagnostycznego,
- $n_{oj, xi}$  - liczba wskazań j-tego objawu przez ekspertów przy i-tym stanie niezdatności,
- $N_{oj}$  - liczba ekspertów biorących udział w badaniach.

Przyjęto, że stopień pewności reguły CF złożonej z kilku przesłanek będzie równy pewności przesłanki o najmniejszej wartości  $CF_s$  [1].

#### 5. Wyniki badań

Pierwsza część formularza pozyskiwania wiedzy ekspertowej, dotyczyła częstości występowania uszkodzeń poszczególnych układów funkcjonalnych okrętowego silnika tłokowego. Pytania zostały przedstawione w formie tabeli zawierającej nazwy poszczególnych układów oraz rubryki, w których eksperci wpisywali odpowiedzi. W celu ułatwienia ekspertom określenia

częstości występowania uszkodzeń danego układu, wprowadzono zbiór zawierający określone wartości częstości. Zbiór ten przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Skala punktowa częstości występowania uszkodzeń  
Tab. 1. Scale of fault frequency

Określenie	Ilość punktów
Nie spotkałem	0
Bardzo rzadko	1
Rzadko	2
Często	3
Bardzo często	4

W celu uniknięcia wątpliwości interpretacyjnych wprowadzono określenie „nie spotkałem” odpowiadające punktacji 0. W związku z tym, że pytania dotyczyły doświadczeń eksploatacyjnych ekspertów, zrezygnowano z określenia „nie występuje”, które ma charakter ogólny i nie musi dotyczyć indywidualnego odczucia wypełniającego ankietę.

Pytania pierwszej części ankiety obejmowały uszkodzenia następujących układów silnika tłokowego:

- układ paliwowy,
- układ tłokowo-korbowy,
- komora spalania,
- układ wymiany czynnika roboczego,
- układ rozruchowo-nawrotny,
- układ chłodzenia,
- układ oleju smarowego.

Na podstawie uzyskanych wyników obliczono wartości średnie częstości uszkodzeń, które przedstawiono w tabeli 2:

Tab. 2. Średnie wartości częstości uszkodzeń poszczególnych układów silnika  
Tab. 2. Medium values of faults frequency in engine subsystems

Lp.	Nazwa układu	Częstość uszkodzeń
1	Układ paliwowy	2,9
2	Układ wymiany czynnika roboczego	1,7
3	Komora spalania	1,5
4	Układ smarowania	1,5
5	Układ tłokowo-korbowy	1,5
6	Układ chłodzenia	1,4
7	Układ rozruchowo-nawrotny	1,3

Według ekspertów największa liczba uszkodzeń występuje w układzie paliwowym (2,9). Zgodnie z zaproponowaną skalą można ją określić jako – często. Na drugim miejscu został wytypowany układ wymiany czynnika roboczego ze średnią częstością uszkodzeń wynoszącą 1,7 (rzadko). W wypadku pozostałych układów średnia częstość uszkodzeń została określona na poziomie 1.5, a więc pomiędzy bardzo rzadko a rzadko.

Wyniki drugiej części ankiety dotyczącej symptomów oraz częstości występowania uszkodzeń w poszczególnych układach, zostaną przedstawione tylko dla układu paliwowego oraz wymiany czynnika roboczego. Ze względu na dużą objętość ankiety, w tej części badań, ograniczono skalę występowania częstości uszkodzeń do czterech stopni.

Tab. 3. Skala punktowa częstości występowania uszkodzeń elementów silnika  
 Tab. 3. Scale of fault frequency of engine elements

Określenie	Ilość punktów
Nie spotkałem	0
Rzadko	1
Często	2
Bardzo często	3

Zadaniem ekspertów było przypisanie częstości uszkodzeń w układach funkcjonalnych oraz określenie symptomów tych uszkodzeń. Wyniki badań dla układu paliwowego oraz wymiany czynnika roboczego przedstawiono w tabelach 4, 5, 6, 7.

Tab. 4. Tablica częstości występowania uszkodzeń elementów układu paliwowego silnika okrętowego  
 Tab. 4. Faults frequency values in fuel system

Nr	Stany niezdatności $f_i$	Częstość uszkodzeń
1	Zakoksowanie otworków wtryskiwacza	1,5
2	Zmiana charakterystyki sprężyny wtryskiwacza	1,4
3	Nieszczelność (podciekanie) wtryskiwacza	1,3
4	Zużycie iglicy wtryskiwacza	1,2
5	Zatarcie pompy wtryskowej	1,2
6	Nieszczelność przewodu wysokiego ciśnienia	1,1
7	Nieszczelność pompy wtryskowej	1
8	Zatarcie iglicy wtryskiwacza	1
9	Pęknięcie sprężyny wtryskiwacza	0,6

Tab. 5. Symptomy uszkodzeń układu paliwowego wraz z wyznaczonymi wskaźnikami pewności  
 Tab. 5. Fuel system faults diagnostic symptoms with coefficient factors

Stany niezdatności $f_i$	Symptomy diagnostyczne $sd_j$							
	Średnie ciśnienie indykowane - spadek	Średnie ciśnienie indykowane - wzrost	Maksymalne ciśnienie spalania - spadek	Maksymalne ciśnienie spalania - wzrost	Temperatura spalin za cylindrem – spadek	Temperatura spalin za cylindrem - wzrost	Alarm przecieków w systemie paliwowym	
	1	2	3	4	5	6	7	
Zakoksowanie otworków wtryskiwacza	1	0,43		0,22		0,43		
Zmiana charakterystyki sprężyny wtryskiwacza	2	0,26						
Nieszczelność (podciekanie) wtryskiwacza	3	0,30		0,22			0,39	
Zużycie iglicy wtryskiwacza	4	0,30						
Zatarcie pompy wtryskowej	5	0,22		0,22		0,43		
Nieszczelność przewodu wysokiego ciśnienia	6					0,35		0,48
Nieszczelność pompy wtryskowej	7	0,26		0,35		0,35		
Zatarcie iglicy wtryskiwacza	8	0,30		0,22			0,26	
Pęknięcie sprężyny wtryskiwacza	9	0,30		0,22		0,22		

Tab. 6. Tablica częstości występowania uszkodzeń elementów układu wymiany czynnika roboczego silnika okrętowego

Tab. 6. Faults frequency values in turbocharged system

Nr	Stany niezdatności $f_i$	Częstość
3	Wzrost oporów przepływu na chłodnicy powietrza	1,4
2	Wzrost oporów przepływu na filtrze powietrza	1,3
4	Przecieki wody na chłodnicy powietrza	0,6
5	Uszkodzenie lub osad na łopatkach turbosprężarki	0,8
1	Uszkodzenie łożysk turbosprężarki	0,3

Tab. 7. Symptomy uszkodzeń układu wymiany czynnika roboczego wraz z wyznaczonymi wskaźnikami pewności  
Tab. 7. Turbocharged system faults diagnostic symptoms with coefficient factors

Stany niezdatności $f_i$	Symptomy diagnostyczne $s_{d_j}$							
	1	2	3	4	5	6	7	
Uszkodzenie łożysk turbosprężarki	1	0,22						
Wzrost oporów przepływu na filtrze powietrza	2		0,43				0,3	
Wzrost oporów przepływu na chłodnicy powietrza	3			0,30	0,22		0,22	
Przecieki wody na chłodnicy powietrza	4					0,22		
Uszkodzenie lub osad na łopatkach turbosprężarki	5	0,30					0,26	

Badania ekspertowe wskazują, iż w wypadku układu paliwowego najczęściej występują uszkodzenia wtryskiwacza. Zaliczono do nich takie uszkodzenia jak:

- zakoksovanie otworków – 1,5,
- zmiana charakterystyki sprężyny – 1,4,
- nieszczelność (podciekanie) – 1,3,
- zużycie iglicy – 1,2.

Pozostałym uszkodzeniom układu paliwowego przypisano częstości w granicach lub poniżej 1, a więc rzadko - spotkałem. Zdecydowana większość ekspertów przypisała uszkodzeniom tego układu zbliżone symptomy diagnostyczne. W większości przypadków wymienili spadek średniego ciśnienia indykowanego, spadek maksymalnego ciśnienia spalania oraz temperatury spalin za cylindrem jako objawy uszkodzeń tego układu. Nie jest możliwe zatem wyodrębnienie relacji diagnostycznych, które w sposób jednoznaczny umożliwiłyby identyfikację tych uszkodzeń.



Drugim układem funkcjonalnym, któremu eksperci przypisali najmniejszą niezawodność był układ wymiany czynnika roboczego. Tutaj wskazano przede wszystkim na dwa uszkodzenia, które pojawiają się najczęściej – wzrost oporów na chłodnicy powietrza (1,4) oraz wzrost oporów na filtrze (1,3). Dla wszystkich uszkodzeń układu wymiany czynnika roboczego eksperci wyodrębnili symptomy, które pozwalają w sposób jednoznaczny zidentyfikować uszkodzenia tego układu.

## **6. Podsumowanie**

Znajomość stanu technicznego okrętowego silnika tłokowego jest konieczna do prowadzenia efektywnej strategii eksploatacji. Umożliwia planowanie niezbędnych czynności obsługowych i remontowych oraz zmniejsza ryzyko wystąpienia awarii.

Istnieje obecnie szereg metod oraz systemów diagnozowania stanu technicznego silników okrętowych, rozwijanych zarówno przez ośrodki badawcze, jak i przez producentów silników. Główną wadą większości współczesnych rozwiązań jest to, że są to systemy zamknięte. Modele procesów roboczych oraz algorytmy oceny stanu technicznego zaimplementowane na etapie tworzenia systemu, nie mogą być modyfikowane w czasie późniejszej eksploatacji. Biorąc pod uwagę długi okres eksploatacji silników okrętowych, należy uznać taki stan rzeczy za poważną wadę. Alternatywą dla takiego stanu rzeczy może być opracowanie systemu ekspertowego wspomagającego diagnozowanie silników okrętowych. Modułowa struktura systemów ekspertowych, a przede wszystkim oddzielenie bazy wiedzy od reszty programu, umożliwia opracowywanie systemów otwartych, w których wiedza diagnostyczna może być w łatwy sposób uaktualniania i rozszerzana. Istotną zaletą tych systemów jest również możliwość reprezentacji wiedzy, pochodzącej z różnych źródeł.

W artykule przedstawiono pierwszy etap tworzenia systemu ekspertowego do diagnozowania okrętowego silnika spalinowego, dotyczący pozyskiwania oraz reprezentacji wiedzy od ekspertów. Zaprezentowano metodologię pozyskiwania oraz sposób reprezentacji wiedzy przybliżonej. Przedstawiono wyniki badań częstości występowania uszkodzeń w poszczególnych układach funkcjonalnych silnika okrętowego oraz wyodrębnione przez ekspertów symptomy uszkodzeń.

Na podstawie badań można stwierdzić, że nie jest możliwe diagnozowanie uszkodzeń układu paliwowego w oparciu o wskazane przez ekspertów symptomy. Większość ekspertów wskazywała na następujące parametry silnika, które mogą być podstawą oceny tego układu: temperatury spalin, średnie ciśnienie indykowane czy maksymalne ciśnienie spalania. Parametry te niosą ogólną informację na temat jakości realizacji procesu roboczego, nie umożliwiają jednak lokalizacji uszkodzeń. W wypadku układu wymiany czynnika roboczego udało się natomiast, wyodrębnić symptomy mogące stanowić podstawę lokalizacji uszkodzeń tego układu. Należy jednak podkreślić, że w wypadku wszystkich symptomów wyznaczone wskaźniki pewności CFs wahały się w granicach (0,2 – 0,4). Oznacza to, że były one wskazane jedynie przez 20 do 40 % ekspertów. Należy zatem podchodzić do tych wyników z dużą ostrożnością.

Po wstępnym etapie badań można stwierdzić, że eksperci nie są wystarczającym źródłem wiedzy dla systemu ekspertowego diagnozowania okrętowego silnika tłokowego. Pozyskane od nich informacje mogą zostać wykorzystane do budowy prototypu bazy wiedzy oraz wyboru układów funkcjonalnych, których uszkodzenia występują najczęściej. Konieczne jest zatem podjęcie dalszych badań nad możliwością wykorzystania innych źródeł wiedzy oraz metod ich pozyskiwania. Szczególne interesujące wydają się tutaj metody umożliwiające automatyczne pozyskiwanie wiedzy z diagnostycznych baz danych.

## **Literatura**

- [1] Cholewa W., *Metoda diagnozowania maszyn z zastosowaniem zbiorów rozmytych*, ZN Pol. Śląskiej nr 764, Seria: Mechanika z. 79, Gliwice 1983.
- [2] Piotrowski I., Witkowski K., *Eksploatacja okrętowych silników spalinowych*, Akademia Morska w Gdyni, Gdynia 2002.

- [3] Kiciński J., *Modelowanie i diagnostyka oddziaływań mechanicznych, aerodynamicznych i magnetycznych w turbozespołach energetycznych*, Wydawnictwo IMP PAN, Gdańsk 2005.
- [4] Korbicz J., Kościelny J., Kowalczyk Z., Cholewa W., *Diagnostyka procesów*, WNT Warszawa 2002.
- [5] Michalski R. S.: *A theory and methodology of inductive learning*, Artificial Intelligence 20 1983.
- [6] Moczulski W., *Metody pozyskiwania wiedzy dla potrzeb diagnostyki maszyn*, ZN Pol. Śląskiej nr 1382, Seria: Mechanika z. 130, Gliwice 1997.
- [7] Mulawka J., J., *Systemy ekspertowe*, WNT, Warszawa 1996.
- [8] Pawletko R., *Współczesne systemy diagnozowania okrętowych silników tłokowych*, XXXIII Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 2006 r.
- [9] Quilian J. R.: *Induction of decision trees*. Machine Learning, 1 (1986).
- [10] Rychlik A., *Wykorzystanie hybrydowego systemu ekspertowego w diagnostyce wybranych maszyn samojezdnych*, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Płock 2005.
- [11] Żółtowski B., Cempel Cz., *Inżyniera Diagnostyki Maszyn*, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Instytut Technologii Eksploatacji PIB Radom, Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004.
- [12] Łobocki M., *Wprowadzenie do metodologii badań pedagogicznych*, Oficyna Wydawnicza IMPULS, Kraków 2001.
- [13] Grzywaczewski Z., *Niezawodność statków*, Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego WEMA, Warszawa 1988.