

## 2

# ZARZĄDZANIE UTRZYMANIEM UKŁADÓW ENERGETYCZNYCH STATKÓW MORSKICH WSPOMAGANE ANALIZĄ RYZYKA

## 2.1 WPROWADZENIE

Elementy układów energetycznych statków morskich eksploatowane są w ramach strategii i metod utrzymania, realizowanych według różnych kryteriów [2]. Przy współczesnym rozwoju technologii projektowania i wytwarzania racjonalne zarządzanie procesem eksploatacji jest warunkiem koniecznym do utrzymania statku w stanie zdatności, a tym samym jego układu energetycznego. Do bezpiecznego wykonania zadania transportowego danego rodzaju statku niezbędne jest zapewnienie strumieni energii mechanicznej, elektrycznej i ciepła niezbędnych dla realizacji podróży morskiej, funkcji przeładunkowych, sterowności, łączności i warunków socjalnych załogi.

Realizacja ruchu statku uzależniona jest od rodzaju zastosowanego napędu głównego statku. Współcześnie w charakterze napędu głównego większości statków towarowych, stosowane są silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym, wielkich i średnich mocy, które wraz z silnikami i urządzeniami umożliwiającymi realizację wszystkich funkcji statku stanowią jego układ energetyczny. Bezpieczeństwo statku w jego realnych warunkach eksploatacji obejmuje takie zagadnienia jak cechy techniczno-konstrukcyjne, logistykę i zarządzanie statkiem oraz stan bezpieczeństwa w układzie energetycznym statku. W eksploatacji statku tylko zagadnienia techniczne wpływają bezpośrednio na wymagane bezpieczeństwo. Zagadnienia organizacji i zarządzania mogą doprowadzić do stanu niezdatności elementów układu energetycznego statku (zawodności zdatności), a pozostałe pojawiają się jako konsekwencje wcześniejszych zdarzeń niepożądanych (zawodności bezpieczeństwa – niedoposażenie statku, brak wykonania odnowy i inne zaniedbania) [5].

## 2.2 WSPÓŁCZEŚNIE STOSOWANE STRATEGIE UTRZYMANIA ELEMENTÓW UKŁADU ENERGETYCZNEGO STATKU MORSKIEGO

Zarządzanie utrzymaniem układu energetycznego statku jest realizowane przez takie działania jak: planowanie i podejmowanie decyzji, organizowanie, kierowanie i kontrolę. Składają się one na strategię eksploatacji definiującą metody utrzymania stanu technicznego na założonym poziomie i w wymaganym okresie ich użytkowania,

wartościowanym często za pomocą kluczowych wskaźników efektywności [1, 2]. Spośród możliwych, na współczesnych statkach, w odniesieniu do konkretnych maszyn i urządzeń, nie zostały w sposób jednoznaczny wdrożone strategie eksploatacji oparte na bieżącej analizie stanu technicznego CBM (ang. Condition Based Maintenance) przy zastosowaniu współczesnych metod i narzędzi diagnostycznych. Często stosowane są mniej zaawansowane, takie jak strategia planowa PM (ang. Planned Maintenance) odnosząca się do realizowania działań utrzymania w sposób zaplanowany, polegający przede wszystkim na wykorzystaniu metod zapobiegawczych PM (ang. Preventive Maintenance) o różnym stopniu wdrożenia, czy ukierunkowana na niezawodność RCM (ang. Reliability Centered Maintenance), strategia według resursu (potencjału eksploatacyjnego), autoryzowana strategia istnienia maszyny (ASIM) i strategia mieszana [1, 8, 10]. Najczęściej utrzymanie w ramach strategii planowo-zapobiegawczej PPM (ang. Planned Preventive Maintenance) planowane jest w oparciu o czas użytkowania czynnego. Podejście tego typu nazywane jest „według czasu” lub „bazującym na czasie” TBM (ang. Time Based Maintenance). W konsekwencji, w odniesieniu do konkretnych maszyn i urządzeń, stosowane są tylko niektóre spośród możliwych strategii utrzymania. W okrętownictwie, jak dotychczas, nie zostało praktycznie wdrożone w zadowalającym stopniu, utrzymanie stanu technicznego na podstawie analizy ryzyka

Zarządzanie eksploatacją układu energetycznego statku realizowane jest zgodnie z wymaganiami ISM Code, Towarzystw Klasyfikacyjnych oraz z przyjętą strategią eksploatacji, gwarantującą spełnianie przez układ energetyczny postawionego przed nim zadania. Realizowane jest ono z wykorzystaniem strategii utrzymania, dostosowanej do wymagań armatora. Z tego też powodu przyjęta strategia eksploatacji, zależnie od wyników dokonywanych analiz bieżących, powinna być korygowana. Podstawą do wprowadzenia modyfikacji powinny być trendy zmian wartości monitorowanych parametrów diagnostycznych. Dlatego coraz częściej pojawia się potrzeba wdrażania strategii TBM (Time Based Maintenance) z możliwością modyfikacji polegającej np. na wydłużaniu czasów międzyremontowych oraz redukcji zakresów obsługi. Podejście takie uzasadnia:

- diagnostyka, która jest realnie częścią utrzymania (diagnostyka ruchowa – cieplno-przepływowa, wibroakustyczna, termowizyjna) jak również częścią obsługi i napraw (diagnostyka postojowa: inspekcje endoskopowe, analiza własności oleju, badania nieniszczące);
- niedoszacowanie, w dotychczasowym okresie eksploatacji statków, czynnika ekonomicznego, tak w obszarze efektywności energetycznej układu/ statku jak i kosztów obsługi/napraw;
- spersonalizowanie utrzymania – indywidualna wiedza i doświadczenie losowo zmieniających się załóg maszynowych statków morskich zastępowała udokumentowaną historię eksploatacji, realizowanych procedur i archiwizowanych statystyk.

Przedstawione uwarunkowania ograniczały, a nie stymulowały, tworzenie strategii utrzymania stanu technicznego urządzeń okrętowych opartej na optymalizacji nakładów ekonomicznych na technikę i bezpieczeństwo [3]. W ograniczonym stopniu wdrożono systemy monitorowania z analizą awaryjności (AMOS, EMOS, NORCONTROL, NORIS, MRS, TASCK ASSYSTENT) [6, 7, 8, 9]. Systemy informatyczne dokumentujące eksploatację rejestrują olbrzymie ilości danych, które z różnych powodów nie da się racjonalnie wykorzystać (nie posiadają bloku operacyjnego do przetwarzania danych dla potrzeb podejmowania decyzji eksploatacyjnych), między innymi dlatego, że hurto-wnie danych tworzone są na podstawie nie do końca dobrze zdefiniowanych potrzeb i wymagań. Dlatego brakuje w strategii utrzymania wiarygodnego oparcia na analizie ryzyka technicznego, do którego niezbędnym jest dysponowanie danymi zawierającymi informacje na temat [11, 12, 13]:

- cech konstrukcyjnych maszyn i urządzeń,
- historii eksploatacji z warunkami pracy,
- awaryjności i niezawodności,
- zaistniałych awarii i innych zdarzeń niepożądanych,
- skuteczności oraz efektywności energetycznej i ekonomicznej (kosztów obsługi i napraw) podejmowanych decyzji w celu poprawy niezawodności i bezpieczeństwa układu energetycznego, które powinny spełniać kryterium kompletności, trafności, wiarygodności (jakości) i być w postaci umożliwiającej ich przetwarzanie.

### **2.3 UWARUNKOWANIA FORMALNO-PRAWNE ZARZĄDZANIA UTRZYMANIEM UKŁADU ENERGETYCZNEGO STATKU MORSKIEGO**

Zgodnie z artykułem 75 kodeksu morskiego statek może być dopuszczony do żeglugi morskiej, gdy odpowiada wymaganiom wynikającym z przepisów i zasad dobrej praktyki morskiej. Jakkolwiek sformułowanie „dobra praktyka morska”, która wynika z wieloletniego doświadczenia uprawiania żeglugi w różnych warunkach jej otoczenia, to przepisy mają już konkretną treść zapisaną i egzekwowaną od armatorów uprawiających taką żeglugę, a także od załóg statków na nich pracujących. Dokumenty te potwierdzają kondycję techniczną statku na podstawie wymagań klasyfikacyjnych jednostki inspekcjonowanej. Realizują one ogólne i szczegółowe wymagania wynikające z rezolucji dyrektyw IMO oraz konwencji SOLAS 1974 (z późniejszymi uzupełnieniami). Wystawiane są one przez klasyfikatora po przeprowadzonej inspekcji statku i prezentacji kontrolowanych w działaniu wyszczególnionych mechanizmów. Stwierdzają one stan techniczny w dniu jego inspekcji, a ponieważ założeniem i celem IMO jest zapewnienie bezpieczeństwa żeglugi oraz środowiska naturalnego w całym okresie życia czynnego statku (także podczas remontów czy okresów wyłączenia z eksploatacji), nałóżono na załogi statków obowiązek okresowego kontrolowania sprawności wyszczególnionych mechanizmów gwarantujących bezpieczeństwo całej jednostki pływającej. Zgodnie z konwencją SOLAS urządzenia te zostały określone i zaliczone do grupy urządzeń tzw. „Critical Equipment”

(CE) i zdefiniowane jako „wyposażenie i systemy techniczne, których nagłe awarie mogą spowodować sytuacje zagrożenia”, wynika to z ISM Circular 01/2008-Critical Equipment Code § 10.3. Zalicza się tu takie mechanizmy jak np.: silniki napędu głównego, urządzenie sterowe, pompy i filtry, sprężarki powietrza, systemy bezpieczeństwa silników napędu głównego i kotłów oraz wiele innych. Wg Konwencji SOLAS, Roz. III.20.6.1. Łączna liczba wyszczególnionych mechanizmów wynosi 47 pozycji, lecz jest ona indywidualna dla każdego statku. Zdolność ruchowa wymienionego wyposażenia, a tym samym statku, zależy od jego stanu technicznego. Osiągane wartości parametrów kontrolowanego mechanizmu są podstawą do uznania przez klasyfikatora jego stanu zdatności. Pomimo faktu, że każdy mechanizm podlega dozorowi technicznemu, wynikającemu z jego Dokumentacji Technicznej Ruchowej (DTR) nadzór klasyfikacyjny odbywa się w oparciu o czas wg kalendarza inspekcji. Są to inspekcje takie jak np. roczne, pięcioletnie, poawaryjne. Na wniosek lub za zgodą armatora mogą być one przyspieszone lub opóźnione w stosunku do terminu obsługi planowych, czyli po przepracowaniu określonej liczby godzin pracy wynikających z przyjętej strategii utrzymania. W praktyce eksploatacji statku mają miejsce przekroczenia wymaganej liczby godzin pracy maszyny do kolejnego przeglądu, bez negatywnych skutków eksploatacyjnych.

Ponieważ wymagania Konwencji (w tym Critical Equipment, Ship Oil Pollution Emergency Plan) dotyczą sprawności ruchowej, zatem możliwe jest wydłużenie terminów obsługi niektórych mechanizmów, zachowując ich przydatność eksploatacyjną [3, 9]. Dotyczyć to może terminów przeglądów np. układów pompowych z napędem elektrycznym i zamontowanych na silnikach napędu głównego (SG), przeglądów planowych układu korbowo-tłokowego SG, przeglądów łożysk głównych, rozrządu silników itd., jeśli nie występują symptomy ich przyspieszonego zużycia, jednak klasyfikator ocenia i dopuszcza do dalszej eksploatacji, kontrolowany mechanizm na podstawie wyników oceny wg jego rzeczywistego stanu technicznego. Nie może on równocześnie zagrażać/naruszać bezpieczeństwa środowiska morskiego.

#### **2.4 WYMAGANIA OCHRONY ŚRODOWISKA MORSKIEGO W ZARZĄDZANIU EKSPLOATACJĄ STATKU**

Wprowadzanie przez Międzynarodową Organizację Morską (IMO) stref kontroli emisji (ECA) oraz wymagania zmniejszenia emisji związków toksycznych w portach Unii Europejskiej, stanowią aktualnie dla żeglugi jedne z najważniejszych wyzwań [4].

Według studium IMO i informacji z pierwszego półrocza roku 2013, obowiązująca jeszcze data wejścia Tier III tj. nowych ostrzejszych dopuszczalnych limitów emisji  $\text{NO}_x$ , w obszarach jego kontroli (NECA) zostanie przesunięta z 1.01.2016 na dzień 1.01.2021. Wprowadzenie odpowiedniej zmiany w przepisach zapowiedziano na posiedzenie Marine Environment Protection Committee MEPC 66 w 2014 roku [1, 2]. Oznacza to, że jeszcze przez pewien czas obowiązywać będzie w tym obszarze ograniczenie Tier II, jak dla pozostałych akwenów.

Podstawowym problem dla armatorów pozostaje zatem zachowanie dopuszczalnego limitu emisji tlenków siarki  $SO_x$ . Ich dopuszczalna emisja jest ograniczona poprzez wprowadzenie limitu zawartości siarki w paliwie. W obszarach kontroli  $SO_x$  (SECA-  $SO_x$  Emissions Control Areas) od 01.01.2015 zacznie obowiązywać dopuszczalny limit 0,1%. Dopuszcza się alternatywnie stosowanie systemów redukujących i monitorujących w sposób ciągły zawartość  $SO_x$  w spalinach, przynajmniej do poziomu wynikającego ze stosowania paliwa o dozwolonej zawartości siarki. Kraje Unii Europejskiej kierują się generalnie przepisami IMO z tym, że zaostrzone przepisy dotyczące emisji tlenków siarki w portach zaczęły obowiązywać wcześniej, bo już od 1 stycznia 2010 roku. Obowiązują one na terenach portów całej wspólnoty i nakazują stosowanie paliw o zawartości siarki nieprzekraczającej 0,1% na jednostkę masy dla statków żeglugi morskiej i śródlądowej podczas postoju w porcie.

W dążeniu do zmniejszenia emisji  $CO_2$  od 1 stycznia 2013 roku, wszystkie nowobudowane statki większe niż 400 BRT muszą mieć wyznaczony Projektowy Wskaźnik Efektywności Energetycznej (Energy Efficiency Design Index – EEDI), zaś wszystkie statki tj. nowe i wybudowane przed tą datą objęte są Planem Zarządzania Efektywności Energetycznej Statku (Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP) zapewniającym optymalną eksploatację statku [4, 9].

Ponadto stosuje się dobrowolnie wskaźnik efektywności eksploatacyjnej (Energy Efficiency Operational Indicator – EEOI) pozwalający na bieżącą ocenę efektywności transportowej statku, który może być uzupełnieniem informacji dla SEEMP [3].

EEOI definiowany jest jako:

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \cdot C_{Fj}}{m_{cargo} \cdot D} \quad (2.1)$$

gdzie:

- $FC$  – masa zużytego paliwa w czasie podróży (jazda w morzu i postój w porcie) przez silniki główne i pomocnicze, kotły oraz spalarkę,
- $J$  – rodzaj paliwa,
- $CF_j$  – współczynnik konwersji wyrażony stosunkiem masy  $CO_2$  powstałego ze spalania zużytego paliwa rodzaju  $J$ ,
- $m_{cargo}$  – masa przewiezionego ładunku (tony) lub wykonana praca (liczba kontenerów TEU lub pasażerów) albo pojemność (GT) dla statków pasażerskich,
- $D$  – dystans w milach morskich, na którym przewieziono ładunek lub wykonano pracę transportową [4].

Osiągnięcie małej wartości EEOI jest możliwe poprzez stosowanie wszelkich przedsięwzięć sprzyjających obniżeniu zużycia paliwa przez statek, także w porcie. Do podstawowych działań zmniejszających EEOI, ale także EEDI, w czasie jazdy w morzu należy np. wykorzystanie ciepła odpadowego ze spalin ale także zastosowanie energii wiatru lub energii słonecznej. Mocno promowane jest także przez Unię Europejską wykorzystanie LNG jako paliwa na statkach.

Wprowadzenie w życie nowych przepisów dotyczących dopuszczalnej zawartości siarki w paliwie tzw. dyrektywy siarkowej, doprowadziło armatorów do konieczności podejmowania trudnych decyzji dotyczących sposobów zarządzania eksploatacją statków. Armatorzy mają do wyboru stosowanie drogiej paliw o niskiej zawartości siarki, instalowanie systemów do oczyszczania spalin ze związków siarki tzw. scrubberów, lub przejście na zasilanie układów energetycznych paliwem alternatywnym do stosowanych dotychczas, np. LNG.

## 2.5 METODY IDENTYFIKACJI ZAGROŻEŃ UKŁADU ENERGETYCZNEGO STATKU

Eksploatacja okrętowych układów energetycznych jest zagadnieniem wieloaspektowym, wymagającym ujmowania zagadnień konstrukcyjnych, mediów roboczych oddziałujących na ich konstrukcję, zagadnień ochrony środowiska morskiego oraz warunków, w jakich konstrukcja jest użytkowana. Ich wzajemne powiązanie może i często wywołuje poważne zagrożenie dla środowiska i ich działania, od drobnych niesprawności (np. zakłócenia w rozpylaniu paliwa przez iglice wtryskowe silnika spalinowego) do poważnych uszkodzeń, wręcz awarii i zniszczeń jego podstawowych elementów konstrukcyjnych (np. zniszczenie tłoka i tulei cylindrowej silnika spalinowego).

Wprowadzenie cyfrowych technik obliczeniowych w rezultacie rozwoju komputeryzacji, do procesów wytwarzania nowych materiałów konstrukcyjnych, projektowania nowych konstrukcji układów energetycznych umożliwił konstruowanie silników o wielkich mocach przy zachowaniu stosunkowo małych gabarytów. Pomimo tego, że silniki te są coraz bezpieczniejsze, to równocześnie wymagają bardziej precyzyjnej identyfikacji możliwych zagrożeń, co wynika bezpośrednio ze zwiększenia osiąganych mocy w przeliczeniu na jednostkę masy silnika (wzrostu mocy jednostkowej). Fakt ten wymusił rozwój metod identyfikacji zagrożeń elementów układu energetycznego takich jak: PHA (Preliminary Hazard Analysis), do których należą metoda Co-Jeśli (What-If) i różnego rodzaju audyty oraz takich metod identyfikacji jak [8, 11, 12]:

- analiza rodzajów i skutków uszkodzeń – FMEA (Failure Modes and Effects Analysis),
- metoda drzewa zdarzeń – ET (Event Tree),
- metoda drzewa uszkodzeń (błędów) – FTA (Fault Tree Analysis).

Uwzględniając współczesne tendencje rozwojowe, w procesach wytwarzania energii, oczywistym jest naturalna konieczność rozwoju i większe doprecyzowanie metod diagnostycznych, a w efekcie otrzymywanie wyników będących podstawą do tworzenia baz i historii zdarzeń, a tym samym podejmowania trafnych i wiarygodnych decyzji eksploatacyjnych

W praktyce eksploatacji statku mają miejsce przekroczenia wymaganej liczby godzin pracy maszyny do kolejnego przeglądu, bez negatywnych skutków eksploatacyjnych. Ponieważ wymagania Konwencji (w tym Critical Equipment, Ship Oil Pollution Emergency Plan) dotyczą sprawności ruchowej, zatem możliwe jest wydłużenie

terminów obsługi niektórych mechanizmów, zachowując ich przydatność do użytkowania w eksploatacji. W konsekwencji przyjęta i realizowana strategia utrzymania elementów układu energetycznego statku jest kompilacją strategii wg stanu technicznego (CBM), planowo-zapobiegawczej (PPM), ukierunkowanej na niezawodność (RCM), resursu technicznego i wg. czasu (TBM), która powinna być zorientowana na bezpieczeństwo, z zastosowaniem metod analizy ryzyka [1, 2, 8, 12].

Trudności i ograniczenia związane z wdrożeniem strategii według ryzyka RBM (ang. Risk Based Maintenance), powodują konieczność oparcia analizy ryzyka na wiedzy i doświadczeniu eksploatacyjnym personelu załóg statków morskich. Fakt ten prowadzi do zastosowania eksperckiej metody (delfickiej) oceny ryzyka technicznego.

Potrzeba przedłużenia czasu pracy między naprawami jest racjonalnie uzasadniona nie tylko w przypadku strategii planowo-zapobiegawczej (PPM), jak również w większości pozostałych strategii. Praktyka eksploatacji elementów układu energetycznego statku narzuca konieczność takiego postępowania dla realizacji nadrzędnych celów wykonywanego zadania transportowego. Wówczas niezbędne jest oszacowanie i analiza niezawodności lub zawodności, rozpatrywanego obiektu (silnika, urządzenia), a w tym na przykład prawdopodobieństwa  $P_i(t)$  określonego zdarzenia  $A_i$ . Wykorzystywane są wówczas głównie modele niezawodnościowe. Do bezpośredniego szacowania prawdopodobieństwa  $P_i(t)$ , a także innych zdarzeń – uwzględnionych w modelach wykorzystujących metody drzew, mogą być stosowane metody statystyczne, opierające się na wynikach badań eksperymentalnych oraz metody eksperckie. Metody statystyczne mogą być stosowane tylko wówczas, gdy dane o zajściach rozważanych zdarzeń są dokumentowane i archiwizowane. Metody eksperckie nie wymagają takich danych. Oparte są one na opiniach ekspertów o prawdopodobieństwie zajścia określonego zdarzenia w określonym czasie. Opinie ekspertów mogą być wyrażane w różnej formie i uzyskiwane na przykład przy użyciu specjalnie przygotowanych ankiet. Trafność oszacowań będzie tym większa im większa liczba ekspertów uczestniczy w badaniach [3].

## **2.6 BADANIA MOŻLIWOŚCI WSPOMAGANIA ZARZĄDZANIA UTRZYMANIEM ELEMENTÓW UKŁADU ENERGETYCZNEGO Z OCENĄ RYZYKA METODĄ EKSPERCKĄ**

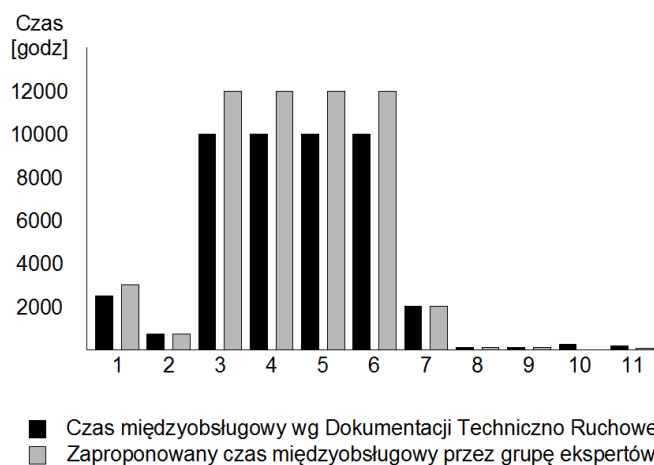
Dla potrzeb zarządzania utrzymaniem elementów układu energetycznego statków, rozpatrzono metodą ekspercką procedury eksploatacyjne dotyczące możliwości wydłużenia czasów pomiędzy obsługami profilaktycznymi silników głównych statków typu RO-RO, eksploatowanych na Morzu Bałtyckim, a ich wyniki przedstawiono w pracy [3]. Statki na których prowadzono badania wyposażone były w dwa niezależne zespoły prądotwórcze, składające się z silnika typu YANMAR M200 AL.-EN X o mocy efektywnej 800 kW oraz prądnicy. Jest to czterosuwowy, szybkoobrotowy silnik o zapłonie samoczynnym, z chłodnicą powietrza doładowującego, bezwodzikowy, z bezpośrednim wtryskiem paliwa.

Silniki te na badanych jednostkach pracują podczas postoju statku w porcie, na kotwicy, podczas manewrowania statkiem oraz w sytuacjach wyjątkowych w trakcie trwania podróży morskiej. Podczas normalnych warunków eksploatacji statku, w trakcie trwania podróży morskiej energię elektryczną dostarczają dwie prądnice wałowe.

W okresie objętym badaniami silniki pomocnicze obsługiwało 60 oficerów mechaników. Wyniki badań eksperckich dotyczących silników pomocniczych zamieszczono w tabeli 2.1, natomiast na rys. 2.1 przedstawiono je graficznie.

**Tabela 2.1 Zestawienie wyników badań eksperckich silników pomocniczych**

Rodzaj obsługi	Czasy międzyobsługowe wg DTR [h]	Czasy międzyobsługowe proponowane [h]
1. Wymiana wtryskiwacza	2500	3000
2. Pomiar ciśnienia spalania	Co 30 dni	Co 30 dni
3. Pomiar luzów w rowkach pierścieni tłokowych	10000	12000
4. Pomiar pierścieni tłokowych	10000	12000
5. Kontrola owaliz. tulei cylindrowej	10000	12000
6. Pomiar tulei cylindrowej	10000	12000
7. Inspekcja karteru	Co 12 tygodni	Co 12 tygodni
8. Przemycanie kanałów przepływowych sprężarki	120	120
9. Przemycanie kanałów przepływowych turbiny	120	120
10. Wymiana oleju w układzie turbosprężarki	Co 10 dni	wg potrzeby
11. Płukanie chłodnicy powietrza doładowania	Co 7 dni	Co 3 dni



**Rys. 2.1 Wyniki badań eksperckich silników pomocniczych**

1 – Wymiana wtryskiwacza; 2 – Pomiar ciśnienia spalania;  
 3 – Pomiar luzów w rowkach pierścieni tłokowych; 4 – Pomiar pierścieni tłokowych;  
 5 – Kontrola owalizacji tulei cylindrowej; 6 – Pomiar tulei cylindrowej; 7 – Inspekcja karteru;  
 8 – Przemycanie kanałów przepływowych sprężarki; 9 – Przemycanie kanałów przepływowych turbiny;  
 10 – Wymiana oleju w układzie turbosprężarki; 11 – Płukanie chłodnicy powietrza doładowania



W odniesieniu do silników pomocniczych ankietowani wyrazili akceptację dla następujących modyfikacji czasu między obsługowego:

- wydłużenie z 2500 godzin do 3000 godzin między obsługowego czas pracy wtryskiwaczy – 75% ekspertów,
- 85% ankietowanych zgodziło się na wydłużenie czasu pracy układu korbowo tłokowego o 20%. Większość ekspertów uważała, że stan układu pozwala na dalszą eksploatację o kolejne 2000 godzin bez znacznego wzrostu ryzyka awarii,
- według ponad 90% ankietowanych, terminy obsługi profilaktycznych turbosprężarki powinny zostać zachowane, podobnie jak w turbosprężarkach silników głównych. Fakt ten uzasadniano wysokimi prędkościami obrotowymi zespołu wirnikowego turbosprężarki.

Powyższą opinię potwierdziło ponad 90% ankietowanych. Kontrola parametrów pracy silnika zespołu prądotwórczego powinna pozostać bez zmian według około 92% procent ekspertów. Uważają oni, że wydłużony czas pracy niektórych elementów silnika powinien być kontrolowany przez monitorowanie parametrów stanu pracy silnika, indykowanie silnika oraz różnego rodzaju inspekcje dodatkowe.

Walidację otrzymanych wyników badania eksperckiego przeprowadzono na wybranym statku typu RO-RO o nośności 6764 DTW i prędkości kontraktowej 19 węzłów, zbudowanym w 1993 roku w holenderskiej stoczni Van der Giessen-de Noord. Statek eksploatowany na Morzu Bałtyckim pod nadzorem Germanischer Lloyd w roku 2006 przeszedł remont główny połączony z klasowym. Eksploatacja układu energetycznego tego statku jak i wyniki remontu potwierdziły możliwość wdrożenia otrzymanych drogą badań eksperckich propozycji wydłużania czasu między obsługowego, co może być istotnym narzędziem w zarządzaniu utrzymaniem układu energetycznego statku.

## PODSUMOWANIE

Pojęcie statku absolutnie bezpiecznego jak dotychczas pozostaje nadal określeniem otwartym i jest przedmiotem programowych prac Towarzystw Klasyfikacyjnych i Międzynarodowej Organizacji Morskiej (IMO) [9]. Fakt ten wynika z braku możliwości jednoznacznego zdefiniowania zdeterminowanych zagrożeń eksploatacyjnych statku morskiego, jak również braku definicji bezpiecznego i efektywnego użytkowania statku określonego rodzaju (masowce, kontenerowce, zbiornikowce itp.). Jest ono uzależnione od projektowych założeń konstrukcyjnych, obarczonych pewną nieokreślonością rozwiązań konstrukcyjnych przyjętych w procesie projektowania i wytwarzania statku oraz losowym oddziaływaniem warunków hydrometeorologicznych w akwenu pływania, sposobu eksploatacji statku i kompetencji, doświadczeń oraz przyzwyczajzeń załogi [1, 2, 3].

W dotychczas stosowanych strategiach utrzymania elementów układów energetycznych statków morskich analiza ryzyka nie stanowiła wsparcia w podejmowaniu decyzji eksploatacyjnych. Nie pozwalał na to realny poziom

technologii systemów monitorowania i archiwizacji zasobów danych z procesu eksploatacji.

Współczesna eksploatacja układów energetycznych jednostek pływających jest procesem coraz dokładniej monitorowanym. Pozwalają na to współczesne systemy nadzoru, pomiarowe, rejestracji i archiwizowania danych, szybsze i zminiaturyzowane komputery oraz uniwersalne i otwarte oprogramowanie. Zgromadzone dane stają się cennym zasobem informacji a ich identyfikacja i analiza pozwala na racjonalizację zarządzania procesem eksploatacji.

Dysponując zaawansowanym systemem monitorowania i archiwizacji procesu eksploatacji można będzie zwiększyć wiarygodność szacowania niezawodności elementów układu energetycznego statku z wykorzystaniem drzewa zdarzeń – ET (Event Tree) lub drzewa uszkodzeń – FTA (Faulier Tree Analysis). Wówczas zarządzanie, np. między innymi optymalizacją czasów pomiędzy obsługami profilaktycznymi będzie mogło być elementem zarządzania utrzymaniem, opartym na bieżącej analizie stanu technicznego CBM (ang. Condition Based Maintenance) z uwzględnieniem oceny ryzyka, w tym metodą ekspercką.

## LITERATURA

- 1 Adamkiewicz A., Burnos A.: Influence of maintenance strategies on the reliability of gas turbines in power systems of floating production, storage and offloading units (FPSO). Technicka Diagnostika, Z1, Rocnik XVIII 2009, CD. 28-th International scientific conference DIAGO@ 2009. Technical diagnostics of machines and Manufacturing equipment. Vysoká škola báňská-Technická Univerzita Ostrava. Asociace Technických Diagnostiků České Republiky, o.s., Ostrava, Rožnov pod Radhoštěm, 27-28. January 2009.
- 2 Adamkiewicz A., Burnos A.: Utrzymanie turbinowych silników spalinowych na jednostkach typu FPSO. Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej 2009, 178 A, str. 9-20.
- 3 Adamkiewicz A., Fydrych J.: Application Of Risk Analysis In Maintenance Of Ship Power System Elements. Scientific Journals Maritime University of Szczecin, Szczecin 2013, 36(108) z.2, pp. 5-12, ISSN 1733-8670.
- 4 Adamkiewicz A., Zeńczak W.: LNG As An Ecological Fuel For Sea- Going Vessels. Paper 20. Symposium Nutzung Regenerativer Energiequellen Und Wasserstofftechnik Stralsund, 7.-9. November 2013, Fachhochschule Stralsund.
- 5 Chybowski L.: Safety criterion in assessing the importance of an element in the complex technological system reliability structure. Management Systems in Production Engineering 2012, Nr 1/(5), PL ISSN 2299-0461.
- 6 Maintenance Reminder System. Program monitorujący eksploatację jednostki badanej. Program autorski Euroafrica Shipping Lines Ltd.
- 7 Mobley R. i inni: Maintenance Engineering Handbook. Seventh Edition, The McGraw-Hill Companies 2008.

- 8 Modarres M. i inni: Reliability engineering and risk analysis. Marcel Dekker. New York 1999.
- 9 Ramęda H.: Zarządzanie bezpieczeństwem statku. Zachodniopomorski Uniwersytet Techniczny, Wydział Techniki Morskiej, Szczecin 2009.
- 10 Raport techniczny Nr RT - 95/T - 01 Niezawodność okrętowych siłowni spalinowych sformułowanie problemu i propozycja jego rozwiązania. Centrum Techniki Okrętowej, Gdańsk 1995.
- 11 Rusin A.: Awaryjność, niezawodność i ryzyko techniczne w energetyce ciepłej. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008.
- 12 Szopa T.: Niezawodność i bezpieczeństwo, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- 13 Trzeszczyński J. i inni: Analiza ryzyka jako wsparcie utrzymania stanu technicznego urządzeń ciepłno-mechanicznych elektrowni. Energetyka, czerwiec 2012. [www.energetyka.eu](http://www.energetyka.eu), str. 23-29.

## ZARZĄDZANIE UTRZYMANIEM UKŁADÓW ENERGETYCZNYCH STATKÓW MORSKICH WSPOMAGANE ANALIZĄ RYZYKA

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono złożoność utrzymania elementów układu energetycznego statku w aspekcie zapewnienia bezpieczeństwa jego eksploatacji. Pokazano możliwe strategie utrzymania, wskazując najczęściej stosowane w okrętownictwie i uzasadniono ich stosowanie. Przedstawiono czynniki ograniczające stosowanie strategii utrzymania wykazując niedostateczne wykorzystanie w tym zakresie analizy ryzyka. Omówiono uwarunkowania formalno- prawne zarządzania utrzymaniem, w tym współcześnie obowiązujące w tym zakresie przepisy ochrony środowiska morskiego. Rozpoznano metody identyfikacji zagrożeń elementów układu energetycznego statku, wskazując na przydatność do tego metody eksperckiej. Przedstawiono wyniki badań przedłużania okresów między obsługowych silników zespołów prądotwórczych eksploatowanych na statkach typu ro-ro, potwierdzających przydatność metody we wspomaganiu zarządzania utrzymaniem układu energetycznego statku.

**Słowa kluczowe:** Utrzymanie stanu, układ energetyczny, statek, okresy między obsługowe, ryzyko techniczne

## MAINTENANCE MANAGEMENT OF MARINE POWER SYSTEMS SUPPORTED BY RISK ANALYSIS

**Abstract:** This article presents the complexity of maintenance of ship power system elements with a view to ensuring its safe operation. Possible maintenance strategies have been shown, indicating those which are most frequently used on ships and their application has been justified. Factors limiting application of maintenance strategies have been listed while indicating insufficient use of risk analysis. Formal and legal aspects of maintenance management have been discussed including the regulations on maritime environment protection which are presently in force. Methods of risk identification of ship power system elements have been studied pointing at the feasibility of the Expert Method. The results of studies on the extension of periods between overhauls of current generating units of engines operating on Ro-Ro type ships have been shown and they confirm that the Method is useful at supporting the management of maintenance of a ship power system.

**Key words:** Condition maintenance, power system, vessel, periods between overhauls, technical risk

dr hab. inż. Andrzej ADAMKIEWICZ, prof. AM  
Akademia Morska w Szczecinie  
Wydział Mechaniczny  
Katedra Diagnostyki i Remontów Maszyn  
ul. Podgórna 51/53, 70-205 Szczecin  
e-mail: A.Adamkiewicz@am.szczecin.pl