

Zbigniew MATUSZAK

Akademia Morska w Szczecinie,
Instytut Eksploatacji Siłowni Okrętowych

PROBLEMY BADANIA EKSPLOATACYJNEJ NIEZAWODNOŚCI SIŁOWNI OKRĘTOWYCH

Słowa kluczowe

Siłownia okrętowa, niezawodność, niezdatność.

Streszczenie

Scharakteryzowano wybrane metody badań niezawodności siłowni okrętowych w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Podkreślono istnienie stałych i zmiennych struktur funkcjonalnych i niezawodnościowych. Zaznaczono stosowanie w badaniach niezawodności: tablic funkcji algebry logiki; metody minimalnych ścieżek zdatności i niezdatności; metody drzew uszkodzeń, metody dekompozycji złożonej. Podkreślono znaczenie poszukiwania rozkładów uszkodzeń systemów siłowni okrętowej.

Wprowadzenie

Na początku lat 90. ubiegłego wieku w Instytucie Technicznej Eksploatacji Siłowni Okrętowych rozpoczęto eksploatacyjne badania niezawodności siłowni okrętowych. Obserwacja i analiza obserwacji uszkodzeń złożonych systemów technicznych, a do takich należą siłownie okrętowe, wymagała przyjęcia określonych kryteriów, wg których jedne z uszkodzeń można uważać za mniej, a inne za bardziej ważne. O ważności elementu w systemie technicznym decy-

duje sposób przyjęcia kryteriów określających jego ważność. Z reguły dla elementów systemów technicznych statków decyduje o tym: liczba uszkodzeń, pracochłonność i czas usuwania uszkodzeń, wpływ uszkodzeń na realizację podstawowych funkcji statku (przewóz towarów), straty ekonomiczne spowodowane uszkodzeniem.

W badaniach niezawodności uczestniczyli członkowie pływającej załogi statku, oficerowie mechanicy zatrudnieni w siłowni statku, których zadaniem była rejestracja i opis zaobserwowanych w siłowniach statków uszkodzeń. W siłowniach statków wyróżniano stałą i zmienną strukturę funkcjonalną systemów siłowni.

Procedurę szacowania prawdopodobieństwa poprawnej pracy systemu o stałej strukturze elementów określono następująco:

- wyodrębnienie podstawowych elementów systemu spełniających założone jego funkcje;
- określenie parametrów technicznych wszystkich podstawowych elementów systemu;
- określenie zmian parametrów systemu i jego podstawowych elementów wynikających z możliwości uszkodzeń elementów pomocniczych w sposób katastroficzny i parametryczny;
- określenie wpływu czynników zewnętrznych na warunki eksploatacji systemu (jeżeli można taki wpływ ściśle określić);
- określenie (oszacowanie) niezawodności każdego podstawowego elementu systemu dla uszkodzeń katastroficznych.

Szacowanie niezawodności systemów o zmiennej strukturze, tj. takich, w których w procesie pracy w różnych momentach pracują różne elementy, charakteryzuje się pewnymi cechami, wynikającymi z zastosowania specyfiki metodyki:

- cykl pracy systemu dzieli się na stany pracy odpowiadające poszczególnym etapom pracy;
- dla każdego stanu pracy określa się struktury funkcjonalne zawierające wszystkie elementy pracujące w czasie danego stanu pracy;
- dla poszczególnych stanów pracy określa się parametry czynników systemu i warunki pracy elementów w analizowanych stanach.

Szczególne znaczenie w analizie niezawodności złożonych systemów technicznych mają systemy zawierające elementy o wzajemnie zależnych uszkodzeniach, tj. takie, których uszkodzenia zmieniają niezawodności innych elementów. Do oszacowania niezawodności systemu wymagana jest wówczas znajomość tzw. warunkowych niezawodności elementów, trudnych do określenia i wymagających pracochłonnych obserwacji eksploatacyjnych.

Niepowtarzalność warunków pracy systemów siłowni, złożona ich budowa każą z pewnym dystansem podchodzić do uogólniania wyników obserwacji uszkodzeń i szacowania niezawodności, z drugiej jednak strony koszty nieprze-

widzianych napraw i kłopoty, jakie wynikają z powodu naprawy w morzu, narzucają konieczność podejmowania i badania zagadnień niezawodności elementów i systemów siłowni okrętowych.

Złożonych struktur funkcjonalnych i niezawodnościowych, jakimi są systemy siłowni okrętowych nie można analizować jako prostych struktur szeregowych, równoległych, szeregowo-równoległych lub nawet progowych. Konieczne staje się w tym przypadku zastosowanie odpowiednich metod, opracowanych dla systemów, które charakteryzują się szczególną złożonością, częstą zmianą struktury pracy i wzajemną zależnością uszkodzeń. Szczególnego znaczenia nabiera badanie rozkładów uszkodzeń systemów siłowni, jeżeli są to obiekty techniczne wytwarzane w krótkich seriach (kilka statków danej serii lub typu). Ułatwieniem w analizie jest występowanie w systemach siłowni okrętowych urządzeń podobnego typu lub wręcz tych samych, pochodzących od jednego producenta.

W pracy dokonano krótkiego, z konieczności, przeglądu wybranych metod, które służyły lub służą do oceny niezawodności złożonych systemów technicznych, a takimi są systemy siłowni okrętowych, na podstawie obserwacji uszkodzeń elementów systemów siłowni okrętowych. Podstawę do analizy stanowiły zawsze zarejestrowane uszkodzenia w instalacjach systemów technicznych siłowni w czasie kilkumiesięcznych obserwacji na statku, związane z pracą w siłowni oficera mechanika okrętowego. Ten sposób zbierania informacji o uszkodzeniach przez osobę pracującą w siłowni charakteryzuje się bardzo wysoką wiarygodnością.

W dalszej części zasygnalizowano metody, którymi posługiwano się, badając niezawodność siłowni okrętowych.

1. Metoda tablicy funkcji algebry logiki (FAL)

W metodzie FAL w celu oszacowania postaci prawdopodobieństwa pracy systemu wyznaczano najpierw funkcję strukturalną analizowanego systemu. Tablicę FAL określano jako pewną formę zapisu wyników w metodzie przeglądu stanów za pomocą algebry Boole'a [1, 2, 4].

Budując tablicę FAL, każdemu wierszowi tablicy odpowiada stan zdatności systemu określony przez stany jego elementów. Z kolei stan każdego elementu systemu oznaczany jest jako „1” gdy jest zdalny i „0”, gdy jest niezdatny. Informacje o stanach elementów w poszczególnych stanach całego systemu tworzą pionowe kolumny, których liczba jest równa liczbie elementów systemu. Przechodząc do zapisu analitycznego zakłada się, że uszkodzenia elementów są od siebie niezależne, stanom zdatności elementów przyporządkowuje się wartości prawdopodobieństwa pracy, a stanom niezdatności wartości dopełnień do jedności.

Podstawową trudność, jaką jest w opisywanej metodzie duża liczba wierszy w tablicy można zmniejszyć przez przyjęcie do analizy jednego typu uszkodzenia elementu, dekompozycję systemu o dużej liczbie elementów na kilka podsystemów analizowanych oddzielnie (wg struktury niezawodnościowej, jak i funkcjonalnej) lub analizę stanów niezdatności systemów, jeżeli występuje ich dużo mniej niż stanów zdadności [12, 15, 16, 19, 20].

2. Metoda minimalnych ścieżek zdadności i niezdatności

W metodzie minimalnych ścieżek zdadności do wyznaczania strukturalnej funkcji systemu wykorzystuje się pojęcie minimalnych ścieżek zdadności [4, 14]. Minimalna ścieżka zdadności (minimalna droga) to minimalny zbiór elementów systemu, których zdadność zapewnia stan zdadności całego systemu. Niezdatność dowolnego elementu wchodzącego w skład minimalnej drogi powoduje stan niezdatności systemu. Z punktu widzenia niezawodności elementy w minimalnej drodze tworzą strukturę szeregową. Ponieważ w analizowanym systemie może istnieć wiele minimalnych dróg, tak więc rzeczywista struktura niezawodnościowa może zostać zastąpiona równoważną strukturą równoległo-szeregową, w której minimalne drogi są połączone równolegle.

Postawą metody minimalnych ścieżek niezdatności jest wyznaczenie funkcji strukturalnej systemu w oparciu o minimalny zbiór elementów, których jednoczesna niezdatność powoduje stan niezdatności całego systemu. Zdadność dowolnego elementu wchodzącego w skład minimalnego przekroju powoduje, że system jest zdadny. Tak więc elementy wchodzące w skład minimalnego przekroju w sensie niezawodnościowym tworzą strukturę równoległą. W analizowanym systemie może istnieć wiele minimalnych przekrojów, które muszą być jednocześnie zdadne, by system był zdadny. Rzeczywista struktura niezawodnościowa systemu może być zastąpiona równoważną strukturą szeregowo-równoległą, w której minimalne przekroje połączone są szeregowo.

Ponieważ istnieje pewna adekwatność pojęć minimalnych dróg i minimalnych przekrojów, można aparat matematyczny opisujący zagadnienia minimalnych ścieżek zdadności wykorzystać do opisu minimalnych ścieżek niezdatności, zamieniając miejscami ścieżkę na przekrój, a określenie zdadny na niezdatny.

Próbę zastosowania metod minimalnych ścieżek zdadności i niezdatności, do analizy niezawodności systemów siłowni zarzucono po stwierdzeniu, iż struktury funkcjonalne systemów siłowni okrętowych charakteryzują się zmianą w czasie pracy poszczególnych urządzeń, które uczestniczą w pracy analizowanego systemu [3, 10, 11]. Ze względu na samoczynność wyłączania lub przełączania się niektórych urządzeń w czasie pracy nie jest możliwe wiarygodne opisanie pracy instalacji okrętowej dla każdej możliwej ścieżki.

3. Metoda drzew uszkodzeń

Metoda drzew uszkodzeń polegała na zbudowaniu modelu logicznego analizowanego systemu siłowni okrętowej, w którym za pomocą operacji logicznych przedstawia się kombinacje niezdatności elementów dające w wyniku określone zdarzenia niezdatności systemu. Za pomocą prostych zależności probabilistycznych można wyznaczyć prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia szczytowego (niezdatność systemu), jeżeli znane są prawdopodobieństwa zdarzeń pierwotnych (niezdatność elementów). Literatura nt. metody drzew uszkodzeń jest bardzo bogata, a analiza systemów siłowni okrętowej tą metodą zawarta jest m.in. w pracach [1, 2, 4, 13, 14]. Mimo dość ciekawych wyników, które ta metoda pozwala uzyskać, nie daje ona pełnej informacji o niezawodności systemów siłowni, a szczególnie nie można jej wykorzystać do poszukiwania rozkładów uszkodzeń ze względu na konieczność narzucania modelu uszkodzeń w analizie jakościowej i ilościowej [13, 14].

4. Metoda dekompozycji złożonej

Metoda dekompozycji złożonej jest jedną z uogólnionych metod dekompozycji, polegającą na tym, że dekompozycji (podziału) n -elementowego systemu dokonuje się względem wybranej grupy elementów o liczności k ($1 < k < n$). W wyniku tych działań otrzymuje się 2^k różnych podsystemów zawierających po $n-k$ elementów. Nowe podsystemy nie zawierają elementów, względem których dekompozycja została przeprowadzona. Jeżeli struktury otrzymanych podsystemów są dalej strukturami złożonymi, przeprowadza się kolejne dekompozycje. Powtarza się je tak długo, dopóki nie uzyska się podsystemów o strukturach prostych i stosunkowo łatwych do oszacowania niezawodności. Efektywność metody zależy od wyboru grupy elementów, względem których wykonuje się dekompozycję. Metoda ta została przez autora zarzucona z podobnych przyczyn jak niemożność zastosowania metod minimalnych ścieżek zdatności i niezdatności, tj. ze względu na konieczność traktowania struktur siłowni jako stałych w swojej strukturze w czasie pracy, podczas gdy ulegają one dynamicznym zmianom co do ilości elementów uczestniczących w pracy [3, 4, 10, 11, 14, 20].

5. Poszukiwanie rozkładów uszkodzeń systemów siłowni okrętowej

Analiza uszkodzeń elementów siłowni okrętowych różnych statków, w których podstawowym obiektem technicznym jest spalinowy silnik główny, wymaga określenia, czy poszczególne systemy statków i dane o uszkodzeniach pochodzą z jednej populacji generalnej albo inaczej – czy można je traktować jako realizację tej samej próby losowej.

Ponieważ dane o uszkodzeniach pochodzą z różnych statków o bardzo zróżnicowanych parametrach technicznych, konieczne jest zweryfikowanie hipotezy, że pochodzą one z jednej populacji albo inaczej – że można je traktować jako realizacje tej samej próby losowej. Tylko taka weryfikacja upoważnia do wyznaczania ogólnych charakterystyk niezawodnościowych dla poszczególnych instalacji na podstawie zebranego materiału statystycznego. Z danych o uszkodzeniach instalacji można uzyskać charakterystyki probabilistyczne zarówno dla chwil uszkodzeń, jak i długości odcinków czasu pomiędzy kolejnymi uszkodzeniami [5, 7, 17, 18, 21, 22].

Do weryfikacji zastosowano test sumy rang Kruskala-Wallisa. W teście tym zakłada się, że danych jest k populacji generalnych o dowolnych rozkładach z ciągłymi dystrybuantami $F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x)$. Z każdej z tych populacji wylosowuje się niezależnie n_i ($i = 1, 2, \dots, k$) elementów do próby. Ponieważ dane o uszkodzeniach instalacji są mało liczne, zatem istotne jest to, że w teście tym nie wymaga się określonej liczności prób.

Z uwagi na charakter danych statystycznych preferowano rozkłady względnie proste i najczęściej wykorzystywane w teorii niezawodności. Zatem kolejno sprawdzano się możliwość zbudowania modelu opartego na rozkładach: wykładniczym, Weibulla, logarytmno-normalnym, gamma,

W celu sprawdzenia zgodności rozkładu empirycznego z wymienionymi czterema rozkładami teoretycznymi posłużono się testem zgodności Kołmogorowa-Smirnowa zawartym w pakiecie STATGRAPHICS. Test ten można stosować dla małych liczebnie prób ($n < 100$) na podstawie danych indywidualnych.

Wyniki testu Kołmogorowa-Smirnowa, w przypadku małych liczebnie prób losowych, są bardziej jednoznaczne niż przy stosowaniu innych testów zgodności.

Zaprezentowany powyżej sposób poszukiwania rozkładów uszkodzeń wydaje się być szczególnie wiarygodny, gdyż pozwala oszacować rozkład uszkodzeń całego systemu siłowni, a więc w konsekwencji możliwość spełniania swoich zadań przez systemy siłowni. Wykonane badania dla kilkudziesięciu siłowni statków Polskiej Żeglugi Morskiej potwierdziły możliwość zastosowania tej metodyki do szacowania rozkładów uszkodzeń poszczególnych systemów siłowni [7, 9, 10, 23, 24, 25, 26, 27].

Uwagi końcowe

Wybór metody oceny niezawodności uzależniony jest od rodzaju analizowanego systemu technicznego. Zależy od wymaganej dokładności oszacowania niezawodności. Zasadniczo metoda powinna być dobierana indywidualnie dla danego systemu technicznego. Powinna uwzględniać założenia upraszczające, dokładność szacowania, przewidywaną pracochłonność. Generalnie powinna uwzględniać możliwie pewne odwzorowanie czynników wpływających na nie-

zawodność analizowanego systemu, jak i zastosowanie jak najprostszej metody analizy.

Przedstawione metody nie były jedynymi, które usiłowano zastosować do analizy niezawodności systemów siłowni i poszukiwania ich rozkładów uszkodzeń. Próbowano zastosować m.in. metody: przeglądu stanów systemów; schematów blokowych; łańcuchów i procesów markowskich; modelowania statystycznego zdarzeń i procesów losowych.

Efektom prowadzonych szeroko rozumianych badań niezawodnościowych w ostatnich latach w Instytucie Eksploatacji Siłowni Okrętowych była zakończona pozytywnie jedna rozprawa habilitacyjna i trzy rozprawy doktorskie.

Bibliografia

1. Matuszak Z., Surma T.: Drzewo uszkodzeń i elementy algebry Boole'a jako sposób oceny niezawodności i diagnozowania instalacji siłowni okrętowej. Materiały XVI Sesji Naukowej Okrętowców – Szczecin – Dziwnówek 1994. Część II, Wyd. Stoczni Szczecińskiej, Szczecin 1994, s. 69–76.
2. Matuszak Z., Surma T.: Application of the damage tree and elements of the Boole algebra in estimating of reliability of power plant engine room installations. Scientific Conference "Transport Systems Engineering", Section 3 – Operation, Maintenance and Reliability of Transport Systems, Warszawa 1995, s. 107–112.
3. Matuszak Z.: System siłowni okrętowej jako złożony system techniczny o zmiennej strukturze funkcjonalnej. Problemy Eksploatacji 4'97(27), s. 511–520.
4. Matuszak Z.: Damage tree and elements of the Boole algebra in estimating of reliability of power plant engine room installations. Collection of research papers of the Baltic Association of Mechanical Engineering Experts № 1, Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad 2001, s. 196–201.
5. Matuszak Z.: Ocena przynależności danych o uszkodzeniach systemów siłowni okrętowych do jednej populacji generalnej. ZN AGH w Krakowie „Automatyka” tom 5, zeszyt 1/2 2001, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2001, s. 411–420.
6. Matuszak Z.: Wybrane mieszaniny rozkładów czasu zdatności obiektów technicznych. ZN WSM w Szczecinie. Szczecin 2002, z. 66, s. 275–286.
7. Matuszak Z.: Modeli otkazow i prinadležnost dannych ob otkazach k generalnoj sowokupnosti na primierie sudowych energetičeskich ustanowok. Kaliningradskij gosudarstwiennyj techničeskij uniwersytet, Kaliningrad 2002, monografia.

8. Matuszak Z.: Kompozicii raspredelenij karakteristik nadiożnosti i modeli otkazow sistem sudowych energeticeskich ustanowok. Kaliningradskij gosudarstwiennyj techniceskij uniwersytet, Kaliningrad 2003, monografia.
9. Matuszak Z.: Poszukiwanie rozkładów uszkodzeń systemów siłowni okrętowych. *Problemy Eksploatacji* 4/2001 (43). Radom 2001, s. 251–262.
10. Matuszak Z.: Uwagi o nadmiarowości i rezerwowaniu systemów siłowni okrętowych. Międzynarodnyj sbornik naucznych trudow „Effektiwnost raboty energeticeskich ustanowok i techniceskich sredstw”, Kaliningradskij gosudarstwiennyj techniceskij uniwersytet, Izdatelstwo KGTU, Kaliningrad 2003, s. 80–89.
11. Matuszak Z.: Podstawy stosowania przekrojów niezdatności do systemów siłowni okrętowych. Międzynarodnyj sbornik naucznych trudow „Effektiwnost raboty energeticeskich ustanowok i techniceskich sredstw”, Kaliningradskij gosudarstwiennyj techniceskij uniwersytet, Izdatelstwo KGTU, Kaliningrad 2003, s. 90–97.
12. Matuszak Z.: Selected safety models of elements and systems in the engine room. *International Scientific Journal „PROBLEMS OF APPLIED MECHANICS”*. Georgian Committee of International Federation for the Machines and Mechanics, Tbilisi (Gruzja) 2004, No 1(14)/2004, s. 30–39.
13. Chybowski L., Matuszak Z.: Podstawy analizy jakościowej i ilościowej metody drzewa niezdatności. *ZN AM w Szczecinie*. Szczecin 2004, z. 1 (73), s. 129–144.
14. Chybowski L., Matuszak Z.: Symulacja niegotowości systemu siłowni okrętowej oparta na drzewie niezdatności. *ZN AM w Szczecinie*. Szczecin 2004, z. 1 (73), s. 145–159.
15. Matuszak Z.: Wybrane metody oceny niezawodności systemów siłowni okrętowych. Międzynarodnyj sbornik naucznych trudow „Nadiożnost i effektiwnost techniceskich sredstw”, Kaliningradskij gosudarstwiennyj techniceskij uniwersytet, Izdatelstwo KGTU, Kaliningrad 2004, s. 109–118.
16. Matuszak Z.: Charakterystyka wybranych metod oceny niezawodności systemów siłowni okrętowych. *ZN PG nr 598 (seria: Budownictwo Okrętowe Nr LXV)*. Gdańsk 2004, s. 159–167.
17. Matuszak Z.: Charakterystyki niezawodnościowe wieloelementowych struktur mieszanych i odnawialnych. *Collection of research papers of the Baltic Association of Mechanical Engineering Experts No 4, Mechanical Engineering of the Baltic Region*, Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad 2004, s. 146–148.
18. Matuszak Z.: Charakterystyki niezawodnościowe kilkuelementowych systemów technicznych o strukturze szeregowej i równoległej o różnych rozkładach czasów zdatności. *Collection of research papers of the Baltic Association of Mechanical Engineering Experts No 4, Mechanical Engineer-*

- ing of the Baltic Region, Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad 2004, s. 149–153.
19. Matuszak Z.: Sowriemiennyye problemy issledowanija nadiożnosti SEU. Trudy IV międzunarodoy konferencji „Innowacji w nauce i obrazowaniu. Kaliningradskij gosudarstwiennyj techniczeskij uniwersytet, Izdatelstwo KGTU, Kaliningrad 2005, s. 381–382.
 20. Chybowski L., Matuszak Z.: Structural redundancy in an offshore vessel dynamic positioning system. *Problemy Eksploatacji*, Radom 2007, nr 3/2007 (66), s. 41–48.
 21. Chybowski L., Matuszak Z.: On calculating algorithms in reliability analysis. *Problemy Eksploatacji*, Radom 2008, nr 2/2008 (69), s. 159–166.
 22. Matuszak Z., Nicewicz G.: Ocena przynależności do jednej populacji generalnej uszkodzeń instalacji sprężonego powietrza w siłowniach okrętowych. *Ekonomika i Organizacja Przedsiębiorstwa*, nr 5(712), Maj 2009, s. 82 + CD s. 357–365.
 23. Matuszak Z., Nicewicz G.: Oszacowanie rozkładu chwil uszkodzeń dla instalacji sprężonego powietrza siłowni okrętowych. *Ekonomika i Organizacja Przedsiębiorstwa*, nr 5(712), Maj 2009, s. 82–83 + CD, s. 366–377.
 24. Matuszak Z., Nicewicz G.: Oszacowanie rozkładów chwil uszkodzeń dla instalacji parowych siłowni okrętowych. *MOTROL. Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa*. Tom 11C, Lublin 2009, s. 130–140.
 25. Matuszak Z., Nicewicz G.: Assessment Of Real Active Power Load Of Marine Generating Sets In Operational Conditions Of Container Vessels. *Journal of Polish CIMAC*. Vol. 4, No. 1, Gdańsk 2009, s. 83–88.
 26. Matuszak Z., Nicewicz G.: Assessment of failure distributions of marine power plants fuel oil systems group. *Journal of POLISH CIMAC*. Vol. 4, No. 2, Gdańsk 2009, s. 207–215.
 27. Matuszak Z.: Estimation of the availability of the Power propulsion and technological system of a fishing vessel at selected operational model. *Eksploatacja i Niezawodność*, 1 (45)/2010, s. 49–58.

Recenzent:

Wiesław ZWIERZYCKI

Problems of power plant service reliability research

Key words

Power plant, reliability, damages.

Summary

Selected methods of power plant service reliability tests in the actual vessel operating conditions are characterized. The existence of fixed and variable structures, functional and reliability-based, is highlighted. The use of the following methods in reliability studies is indicated: algebra of logic function tables, minimal paths usable and unusable; trees of damages, complex decomposition. The importance of seeking engine room defects distribution systems is stressed.