

ZASTOSOWANIE ANALIZY DRZEWA NIEZDATNOŚCI DO OCENY PRACY WYBRANYCH SYSTEMÓW SIŁOWNI OKRĘTOWEJ PROMU PASAŻERSKO-SAMOCHODOWEGO

Summary

Application of Fault Tree method for operation analysis of marine power plant systems based on passenger-car ferry example, in general outline has been presented. Basic issues connected with qualitative evaluation and selected quantitative system measures, used in Fault Tree Analysis have been shown. Selected marine power plant systems installed onboard passenger-car ferry and their models as Fault Tree diagrams have been described. Particular trees in the form of Boolean models have been shown.

1. Wprowadzenie

Siłownia okrętowa stanowi zamknięty, izolowany i uszeregowany hierarchicznie system, w skład którego wchodzi elementy i podzespoły zróżnicowane pod względem budowy i pełnionej przez nie funkcji [4, 8]. Głównym zadaniem, które realizuje siłownia, jest zapewnienie możliwości napędu statku i zasilanie wszystkich urządzeń siłowni jak i znajdujących się poza nią, a niezbędnych do żeglugi lub też ją ułatwiających. Prawdopodobieństwo wykonania postawionego siłowni zadania, zależne jest bezpośrednio od niezawodności jej elementów, a więc całej siłowni. Wynika z tego, że od jej prawidłowej pracy zależy możliwość żeglugi oraz jej bezpieczeństwo [7].

Analiza niezawodności opiera się w dużym stopniu na rachunku prawdopodobieństwa, statystyce matematycznej, związana jest ściśle z procesami uszkodzeń i dotyczy pewności działania obiektu poddawane analizie. Dotychczas opracowano wiele metod analizy niezawodnościowej dających wyniki w formie ilościowych i jakościowych miar niezawodności [3, 6]. Probabilistyczna ocena niezawodności w ujęciu klasycznym, stanowi przeważnie pierwszy etap do pełnej oceny niezawodności. Następnym krokiem są badania uwzględniające aspekty fizyczne niezawodności, powiązanie czasu pracy poszczególnych elementów obiektu złożonego z czasem pracy obiektu i jego niezawodnością itp.

Jedną z metod szacowania niezawodności jest analiza drzewa niezdatności (FTA). Analiza systemów w oparciu o drzewo niezdatności FTA (ang. *Fault Tree Analysis*) polega na szczegółowym i dedukcyjnym badaniu zasad pracy rozpatrywanego systemu technicznego. Drzewo niezdatności budowane jest ze zbioru symboli połączonych wzajemnie relacjami przyczynowo-skutkowymi [1, 2, 5].

Dla przedstawienia możliwości modelowania i analizy systemów siłowni okrętowej metodą FTA zbudowano modele w formie drzew dla wybranych systemów siłowni okrętowej jednego promów [11]

pasażersko-samochodowych polskiego przedsiębiorstwa żeglugi promowej.

2. Analiza jakościowa drzewa niezdatności

Każde drzewo niezdatności można przekształcić w całkowicie równoważny zbiór równań boolowskich, który może następnie służyć do analizy jakościowej. Zapis drzewa uszkodzeń w postaci równań boolowskich pozwala na ich wykorzystanie do określenia zbioru przekrojów minimalnych danego drzewa [9, 10].

Przekrój minimalny jest to pewna najmniejsza kombinacja zdarzeń elementarnych danego drzewa niezdatności, których jednoczesne wystąpienie powoduje pewien stan niezdatności systemu zdefiniowany przez zdarzenie wierzchołkowe.

Każde drzewo niezdatności charakteryzuje się skończoną liczbą przekrojów minimalnych zależną od liczby zdarzeń składowych, liczby i konfiguracji bramek logicznych. Przekroje minimalne mogą być jedno lub wieloelementowe. k -elementowy przekrój minimalny jest kombinacją k zdarzeń elementarnych, które muszą zdarzyć się wszystkie, aby wystąpiło zdarzenie szczytowe.

Zbiór przekrojów minimalnych można przedstawić za pomocą równania:

$$ZS = P_{m,1} + P_{m,2} + \dots + P_{m,N} = \sum_{j=1}^N P_{m,j} \quad (1)$$

gdzie:

ZS – zbiór przekrojów minimalnych właściwych dla danego zdarzenia wierzchołkowego;

$P_{m,j}$ – j -ty przekrój minimalny należący do zbioru;

N – liczba przekrojów minimalnych.

Każdy przekrój minimalny składający się z k -elementowej kombinacji zdarzeń elementarnych można przedstawić jako:

$$P_{m,j} = E_1 \cdot E_2 \cdot \dots \cdot E_k \quad (2)$$

gdzie :

E_1, E_2, \dots, E_k – zdarzenia elementarne wchodzące do j -tego przekroju minimalnego;

K – liczba zdarzeń elementarnych j -tego przekroju minimalnego.

Wyznaczenie zbioru przekrojów minimalnych dla danego drzewa niezdatności wymaga zmiany drzewa niezdatności na równoważny mu zbiór równań Boole'a oraz określenie zdarzenia szczytowego przy wykorzystaniu algebry Boole'a przy analizie drzewa niezdatności „od dołu do góry” lub „od góry do dołu”.

3. Analiza ilościowa drzewa niezdatności

Matematyczny model niezdatności elementów systemu technicznego powinien możliwie wiernie odwzorować warunki pracy elementu, a jednocześnie powinien być możliwie prosty o parametrach łatwych do określenia metodą empiryczną.

Rozróżnia się dwa podstawowe typy modeli matematycznych opisujących uszkodzenia elementów i systemów technicznych:

- modele dyskretne (tzw. „działanie na żądanie”),
- modele ciągłe (tzw. „zależne od czasu”).

Dla elementów instalacji siłowni i całej siłowni przyjmuje się model ciągły.

Funkcja niezawodności $R(t)$ definiowana jest jako prawdopodobieństwo, że element instalacji siłowni w chwili $t \geq 0$ znajduje się w stanie zdatności:

$$R(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right] \quad (3)$$

gdzie:

$\lambda(t)$ - intensywność uszkodzeń.

Rozkładając rozkład wykładniczy elementów (uszkodzenie elementu zależne jest jedynie od czasu jego pracy), tj. $\lambda(t) = const = \lambda$, powyższa zależność przyjmuje postać:

$$F(t) = e^{-\lambda t} \quad (4)$$

Funkcja zawodności $F(t)$, definiowana jest jako prawdopodobieństwo uszkodzenia elementu siłowni w chwili t :

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (5)$$

Założenie o niezależności od czasu intensywności uszkodzeń elementów mechanicznych zostało potwierdzone w badaniach empirycznych dla szerokiego przedziału eksploatacji z wyjątkiem początkowego okresu eksploatacji (docieranie) i końcowego (gwałtowny wzrost zużycia).

W analizie ilościowej drzewa niezdatności stosuje się jako podstawową charakterystykę niezawodnościową niegotowość operacyjną $q(t)$, definiowaną jako prawdopodobieństwo, że w chwili t element systemu technicznego nie jest w stanie wykonać przewidzianych dla niego zadań, a więc że jest uszkodzony, poddany przeglądowi (kontrola) lub jest naprawiany.

Dla elementów nienaprawialnych dla których uszkodzenie występuje w chwili t :

$$q(t) = F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (6)$$

Jeżeli $F(t) < 0,1$ to powyższą zależność można aproksymować jako:

$$q(t) \approx \lambda t \quad (7)$$

W przypadku, jeżeli rozpatruje się element naprawialny, należy uwzględnić czas potrzebny na przywrócenie jego zdatności, co powoduje, że $q(t) \neq F(t)$.

Dla elementów, których uszkodzenia są wykrywane natychmiast po ich uszkodzeniu (kontrola ciągła), niegotowość operacyjną określa zależność:

$$q(t) = \frac{\lambda \cdot T_D}{1 + \lambda \cdot T_D} \cdot \left(1 - e^{-\frac{(1 + \lambda \cdot T_D)t}{T_D}} \right) \quad (8)$$

gdzie:

λ - intensywność uszkodzeń;

T_D - średni czas przywrócenia gotowości operacyjnej.

Jeżeli $\lambda \cdot T_D < 0,1$ powyższą zależność można aproksymować jako:

$$q(t) \approx \lambda \cdot T_D \quad (9)$$

która charakteryzuje się błędem do 0,1.

Dla elementów kontrolowanych okresowo w odstępach czasu T , średnią niegotowość operacyjną określa zależność:

$$\bar{q} = \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T (1 - e^{-\lambda t}) dt = 1 + \frac{1}{\lambda \cdot T} (e^{-\lambda T} - 1) \frac{\lambda \cdot T}{2!} - \frac{(\lambda \cdot T)^2}{3!} + \frac{(\lambda \cdot T)^3}{4!} - \dots \quad (10)$$

Jeżeli $\lambda \cdot T < 0,1$ powyższą zależność można aproksymować jako :

$$\bar{q} \approx \frac{\lambda \cdot T}{2} \quad (11)$$

Wprowadzając pojęcie cząsteczkowej niegotowości $Q_j(t)$ definiuje się ją jako prawdopodobieństwo zdarzenia, że dany system (instalacja) siłowni jest niezdatny w chwili t pod warunkiem wystąpienia danego, odpowiadającego tej cząsteczkowej niegotowości przekroju minimalnego. $Q_j(t)$ oznacza niegotowość operacyjną systemu ze względu na wystąpienie j -tego przekroju minimalnego.

Przekrój minimalny jest pewną kombinacją zdarzeń elementarnych i może wystąpić wtedy i tylko wtedy, gdy wszystkie elementy występują równocześnie. Przy założeniu niezależności elementów, występuje zależność:

$$Q_j(t) = q_1(t) \cdot q_2(t) \cdot q_3(t) \cdot \dots \cdot q_{K_j}(t) = \prod_{n=1}^{K_j} q_{n,j}(t) \quad (12)$$

gdzie:

$q_{n,j}(t)$ – niegotowość operacyjna w chwili t , n -tego elementu j -tego przekroju minimalnego;

K_j – liczba elementów w j -tym przekroju minimalnym.

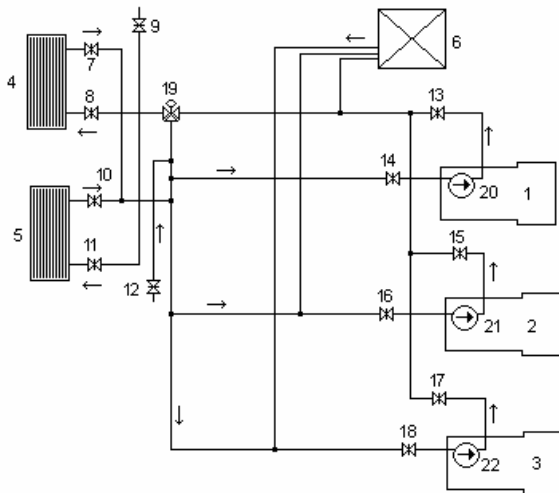
4. Modele wybranych systemów siłowni okrętowej

Modele w formie drzew niezdatności zbudowano dla systemu chłodzenia wodą słodką silników pomocniczych, systemu oleju smarnego silników głównych oraz systemu zasilania paliwem silników głównych. Na rysunkach drzew niezdatności jako zaciemnione przedstawiono elementy, które uległy

uszkodzeniu w czasie prowadzenia obserwacji pracy siłowni okrętowej w morzu. Dla poszczególnych drzew zbudowano boolowskie modele jakościowe.

4.1. System wody słodkiej chłodzącej silniki pomocnicze

Trzy silniki pomocnicze posiadają wspólny zamknięty system wody słodkiej chłodzącej tworzący trzy obiegi wymuszone po jednym dla każdego silnika. Gorąca woda z silnika wraca poprzez chłodnice (4,5) na ssanie pompy (20,21,22) i schłodzona wraca do silnika. Uzupełnienie wody w systemie odbywa się w zbiorniku wyrównawczym z systemu hydroforowego (6). Temperatura na wylocie z silników głównych jest utrzymana samoczynnie zaworem termoregulacyjnym AMOT (19). Schemat instalacji chłodzenia silników pomocniczych pokazano na rys. 1. Poszczególne numery na rys 1. oznaczają: 1-3 – silnik pomocniczy; 4,5 - chłodnica wody słodkiej o powierzchni wymiany ciepła 20 m²; 6 - zbiornik wyrównawczy o pojemności 1000 l.; 7-18 – zasuwa; 19 – zawór termoregulacyjny; 20-22 – pompa podwieszona o wydajności 35m³/h.



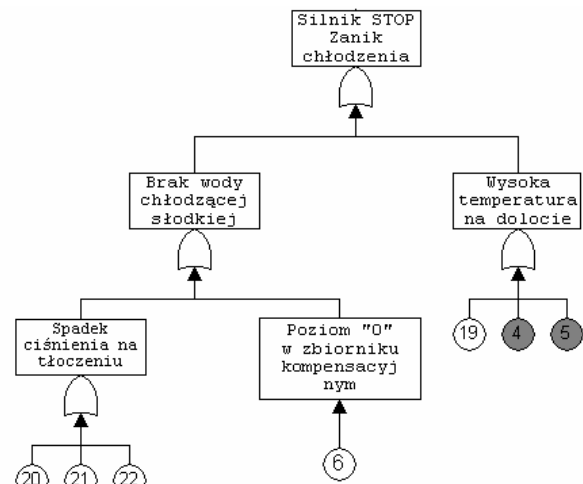
Rys.1. System wody słodkiej chłodzącej silniki pomocnicze.

Zdarzenia szczytowe systemu (czyli zanik chłodzenia, który w konsekwencji prowadzi do zatrzymania silników) wystąpi w następujących przypadkach (operator typu LUB): braku dopływu wody chłodzącej słodkiej – może to nastąpić z powodu spadku ciśnienia na tłoczeniu pomp wody słodkiej (20,21,22) lub w wyniku braku wody słodkiej w zbiorniku kompensacyjnym (6); wysokiej temperatury na dolicie do silników – może to nastąpić z powodu uszkodzenia chłodnic wody słodkiej (4,5) lub uszkodzeniem zaworu termoregulacyjnego (19).

Na rysunku 2 przedstawiono drzewo niezdatności systemu chłodzenia wodą słodką silników pomocniczych (oznaczenia są zgodne z przedstawionymi na rys. 1).

Dla drzewa niezdatności przedstawionego na rys. 2. na podstawie praw algebry Boole'a uzyskuje się równanie określające warunki wystąpienia zdarzenia szczytowego:

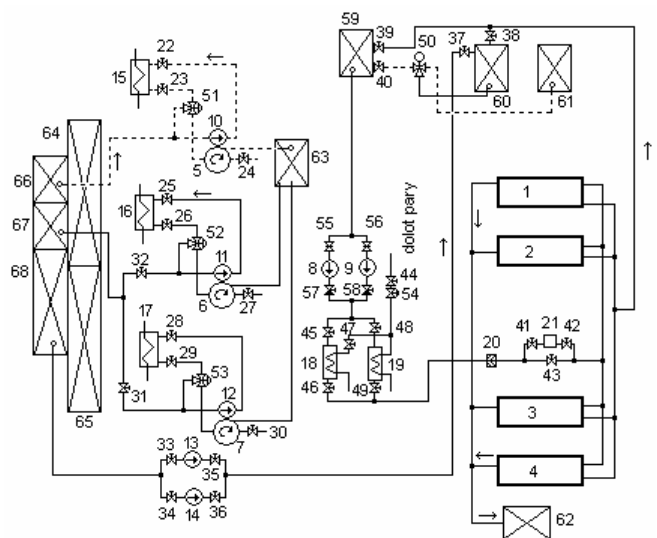
$$ZS = P_{20} \cap P_{21} \cap P_{22} \cup P_6 \cup P_{19} \cap P_4 \cap P_5 \quad (13)$$



Rys. 2. Drzewo niezdatności systemu chłodzenia wodą słodką silników pomocniczych.

2.2. System paliwowy.

System paliwowy jest wspólny dla czterech silników głównych. Paliwo ze zbiornika oleju opałowego odwirowanego (68) jest ciągle podawane pompami uzupełniającymi (13,14) do zbiornika rozchodowego (60). Nadmiar paliwa ze zbiornika (60) poprzez przelew powraca do zbiornika (68). Olej opałowy lub olej napędowy ze zbiornika (60) lub (61) grawitacyjnie sływa do zbiornika zwrotnego (59) skąd pompą podającą (8,9) poprzez podgrzewacz (18,19) i filtr (20) jest podany do silników głównych. Na dolicie paliwa do silnika głównego zamontowany jest wiskozymetr (21), który reguluje lepkość paliwa przez regulację wydatku pary grzewczej przepływającej przez podgrzewacz. Nadmiar paliwa z pomp wtryskowych powraca do zbiornika zwrotnego (59) lub zbiorników rozchodowych. Schemat instalacji chłodzenia silników pomocniczych pokazano na rys. 3.



Rys. 3. System paliwa silników głównych.

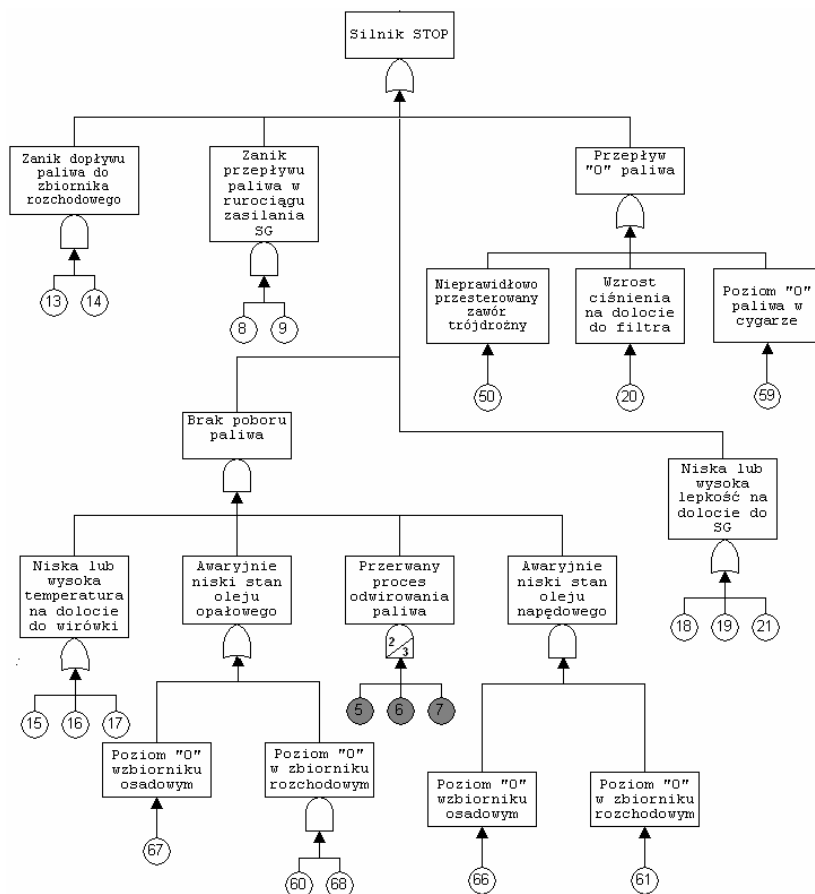
Poszczególne numery na rys 3. oznaczają: 1-4 – silnik główny; 5 – wirówka oleju napędowego; 6,7 – wirówka oleju opałowego; 8 – pompa podająca paliwo do silników głównych, śrubowa o wydajności 7,5 m³/h; 9 – pompa podająca paliwo do silników głównych, śrubowa o wydajności 10,4 m³/h; 10-12 – pompa; 13,14 – pompa uzupełniająca zbiornik rozchodowy oleju opałowego o wydajności 4,3 m³/h; 15-19 – podgrzewacz; 20 – filtr paliwa; 21 – wiskozymetr; 22-49 – zawór zaporowo-przelotowy sterowany ręcznie; 50 – zawór trójdrogowy z wyłącznikiem krańcowym; 51-53 – zawór trójdrogowy, regulacyjny; 54 – zawór regulacyjny; 55,56 – zasuwa; 57,58 – zawór zaporowo-zwrotny, przelotowy; 59 – zbiornik zwrotny paliwa o pojemności 380 l; 60 – zbiornik rozchodowy oleju opałowego o pojemności 3,4 m³; 61 – zbiornik rozchodowy oleju napędowego o pojemności 12 m³; 62 – zbiornik sygnalizacji przecieków paliwa S.G.; 63 – zbiornik odpadowy z wirówek; 64 – zbiornik ścieków; 65 – zbiornik przelewowy paliwa; 66 – zbiornik osadowy oleju napędowego o pojemności 14,5 m³; 67 – zbiornik osadowy oleju opałowego o pojemności 48,3 m³; 68 – zbiornik oleju opałowego odwirowanego o pojemności 30,3 m³.

Zdarzenia szczytowe systemu (czyli brak zasilania paliwem, który w konsekwencji prowadzi do zatrzymania silników) wystąpi w następujących przypadkach (operator typu LUB): zaniku dopływu paliwa do zbiornika rozchodowego w wyniku uszkodzenia pomp paliwowych (13,14), (operator typu

I); zaniku przepływu paliwa w rurociągu zasilania silników głównych przez pompy paliwowe (8,9), (operator typu I); braku przepływu paliwa, co może być spowodowane nieprawidłowo przesterowanym zaworem trójdrożnym (50), wzrostem ciśnienia na dolocie do filtra (20) lub brakiem paliwa w zbiorniku (59), (operator typu LUB); niskiej lub wysokiej lepkości na dolocie do silników głównych spowodowanym uszkodzeniem podgrzewaczy (18,19) lub wiskozymetru (21), (operator typu LUB) oraz braku poboru paliwa spowodowanym (operator typu I):

- niską lub wysoką temperaturą na dolocie do wirówek w wyniku uszkodzenia podgrzewaczy (15,16,17), (operator typu LUB),
- awaryjnie niskim poziomem oleju opałowego (operator typu LUB) w zbiorniku osadowym (67) lub w zbiornikach rozchodowych (60,68), (operator typu I),
- przerwany proces odwirowania paliwa w wyniku uszkodzenia wirówek (5,6,7), (operator typu $n z k$),
- awaryjnie niskim poziomem oleju napędowego w zbiorniku osadowym (66) i w zbiorniku rozchodowym (61), (operator typu I).

Na rysunku 4 przedstawiono drzewo niezdatności systemu zasilania paliwem silników głównych (oznaczenia są zgodne z przedstawionymi na rys. 3).



Rys. 4. Drzewo niezdatności systemu zasilania paliwem silników głównych.

Dla drzewa niezdatności przedstawionego na rys. 4. na podstawie praw algebry Boole'a uzyskuje się równanie określające warunki wystąpienia zdarzenia szczytowego:

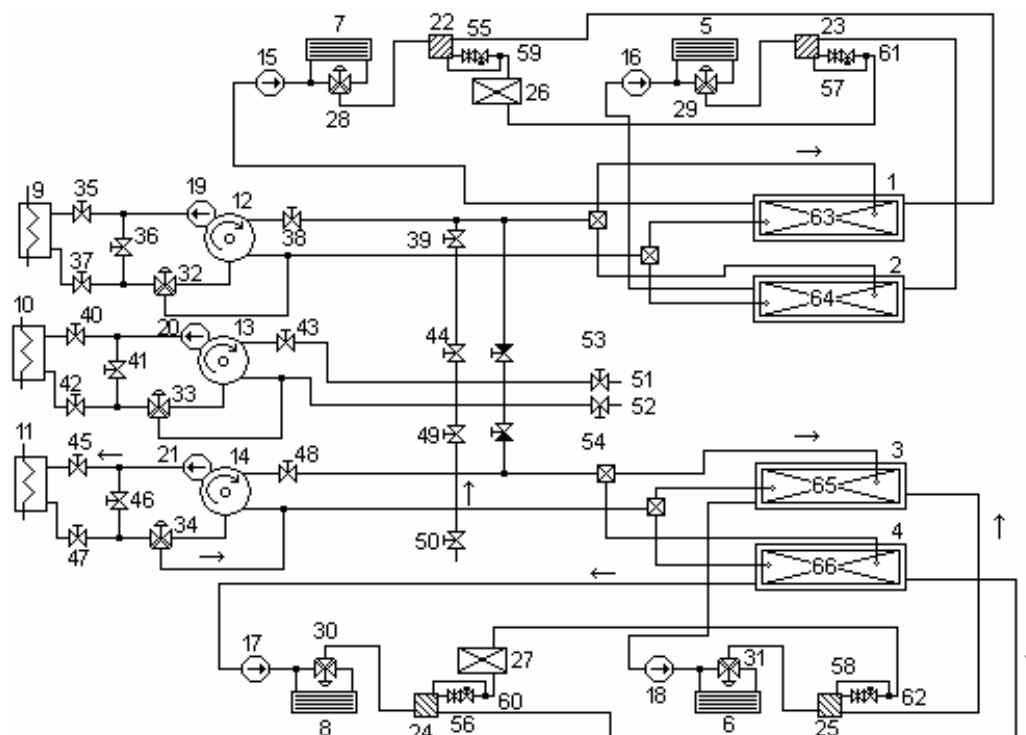
$$\begin{aligned}
 ZS = & P_{13} \cup P_{14} \cup P_8 \cup P_9 \cup P_{50} \cap P_{20} \cap P_{59} \cup \\
 & \cup P_{18} \cup P_{19} \cup P_{21} \cup P_{15} \cap P_{16} \cap P_{17} \cup P_{67} \cup \\
 & \cup P_{60} \cup P_{68} \cup P_5 \cup P_6 \cup P_7 \cup P_{66} \cup P_{61}
 \end{aligned} \quad (14)$$

2.3. System oleju smarowego silników głównych

Każdy silnik posiada odrębny obieg oleju smarowego. Pompa olejowa (15,16,17,18) zasysa olej ze zbiornika obiegowego i podaje na chłodnicę oleju (5,6,7,8), skąd olej jest podawany do silnika głównego. Olej z silnika spływa do misy ściekowej silnika, skąd jednym spustem spływa do zbiornika obiegowego. Temperatura oleju na

dolocie do silnika utrzymywana jest samoczynnie zaworem termoregulacyjnym AMOT.

Schemat instalacji oleju smarowego silników głównych pokazano na rys. 5. Poszczególne numery na rys 5. oznaczają: 1-4 – silnik główny; 5-8 – chłodnica oleju smarowego o powierzchni wymiany ciepła 70 m²; 9-11 – podgrzewacz; 12-14 – wirówka oleju smarowego; 15-18 - pompa oleju smarowego, pionowa, śrubowa o wydajności 56 m³/h; 19-21 – pompa; 22-25 – filtr oleju; 26,27 – zbiornik odpadów z filtrów o pojemności 490 l.; 28-34 – zawór trójdrożny; 35-52 – zawór zaporowo-przelotowy sterowany ręcznie; 53,54 – zawór zaporowo-zwrotny, przelotowy; 55-58 – zasuwa; 59-62 – zawór sterowany elektrycznie; 63-66 – zbiornik obiegowy o pojemności 7,2 m³.



Rys.5. System oleju smarowego silników głównych.

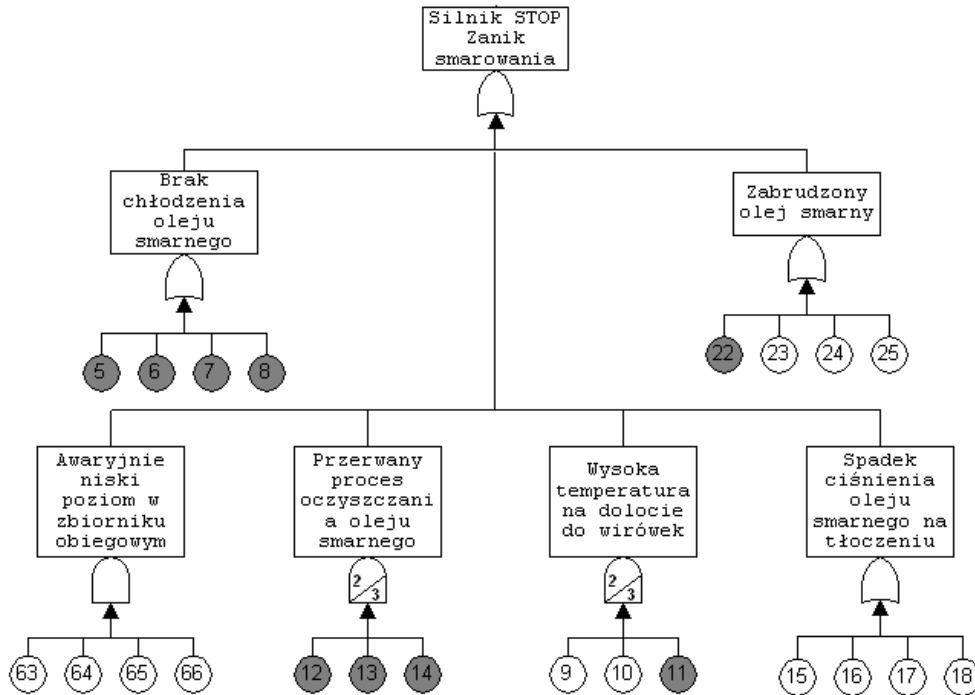
Zdarzenia szczytowe systemu (czyli zanik smarowania, który w konsekwencji prowadzi do zatrzymania silników) wystąpi w następujących przypadkach (operator typu LUB): braku chłodzenia oleju smarowego, który następuje w wyniku uszkodzenia chłodziń oleju smarowego (5,6,7,8), (operator typu LUB); zabrudzenia oleju smarowego, co jest spowodowane uszkodzeniem lub zabrudzeniem filtrów olejowych (22,23,24,25), (operator typu LUB); awaryjnie niskiego poziomu w zbiornikach obiegowych (63,64,65,66), (operator typu I); przerwania procesu oczyszczania oleju smarowego, co następuje w wyniku uszkodzenia wirówek (12,13,14), (operator typu $n z k$); wysoką temperaturą na dolocie do wirówek, która nastąpi w razie uszkodzenia podgrzewaczy (9,10,11), (operator typu $n z k$); spadkiem

ciśnienia oleju na tłoczeniu pomp olejowych (15,16,17,18), (operator typu LUB).

Na rysunku 6 przedstawiono drzewo niezdatności systemu oleju smarowego silników głównych (oznaczenia są zgodne z przedstawionymi na rys. 5).

Dla drzewa niezdatności przedstawionego na rys. 6. na podstawie praw algebry Boole'a uzyskuje się równanie określające warunki wystąpienia zdarzenia szczytowego:

$$\begin{aligned}
 ZS = & P_5 \cap P_6 \cap P_7 \cap P_8 \cup P_{22} \cap \\
 & \cap P_{23} \cap P_{24} \cap P_{25} \cup P_{63} \cup P_{64} \cup P_{65} \cup \\
 & \cup P_{66} \cup P_{12} \cup P_{13} \cup P_{14} \cup P_9 \cup P_{10} \cup \\
 & \cup P_{11} \cup P_{15} \cap P_{16} \cap P_{17} \cap P_{18}
 \end{aligned} \quad (15)$$



Rys. 6. Drzewo niezdatności systemu smarowego silników głównych.

3. Uwagi końcowe

Analizę z wykorzystaniem metody *FTA* dla oceny niezawodności, a także bezpieczeństwa systemów technicznych ukierunkować można na co najmniej trzy aspekty:

- analizę przyczyn zawodności bezpieczeństwa na podstawie funkcjonalnych właściwości systemu. Problem ten jest zazwyczaj rozwiązywany za pomocą metody drzewa zdarzeń *ETA* (metody *FTA* i *ETA* można wykorzystać wspólnie)
- weryfikacja różnego rodzaju hipotez, dotyczących bezpieczeństwa systemów. Problem ten jest rozwiązywany zwykle metodami symulacji komputerowej (analiza drzew niezdatności wsparta może być modelami Markowa lub symulacją Monte Carlo)
- przybliżone oszacowanie szans wystąpienia mało prawdopodobnych zdarzeń jakimi są uszkodzenia niebezpieczne. Wstępnego oszacowania szans tego typu zdarzeń dokonuje się metodą ekspertów. Wypowiedzi ekspertów często są oparte na intuicji i na podstawie doświadczenia wynikającego z obserwacji sytuacji analogicznych, występujących ich praktyce. W dużym stopniu oceny ekspertów stanowią uzupełnienie informacyjne do analizy bezpieczeństwa z wykorzystaniem drzewa zdarzeń, drzewa niezdatności i symulacji komputerowej.

Materiał wskazuje możliwości adaptacji metody *FTA* dla potrzeb analizy pracy systemów siłowni okrętowych. Z uwagi na ograniczoną objętość przedstawiono jedynie uproszczone przykłady modeli *FTA* zbudowanych dla systemów okrętowych oraz nie

przedstawiono analizy ilościowej zaprezentowanych modeli w związku z brakiem pełnej informacji o uszkodzeniach elementów przedstawionych systemów.

Należy pamiętać, że metoda drzewa niezdatności jest jedną z wielu metod (często wzajemnie się uzupełniających) i sama w sobie nie jest wystarczająca do pełnej analizy bezpieczeństwa, natomiast dla oceny gotowości i niezawodności stanowi zwykle wystarczająco silne narzędzie analityczne.

Literatura

1. Chybowski L., *Analiza pracy systemu energetyczno-napędowego statku typu offshore z wykorzystaniem metody drzew uszkodzeń*. Materiały XXII Sympozjum Siłowni Okrętowych SymSO 2001. WTM Politechnika Szczecińska, Szczecin 2001, s. 83-88.
2. Chybowski L., *Zastosowanie drzewa uszkodzeń do wybranego systemu siłowni okrętowej*. Boprosy Povysheniya Effektivnosti Sudovykh i Stacionarnykh Energeticheskikh Ustanovok. Mezhdunarodnyj Sbornik Nauchnykh Trudov. KGTU, Kaliningrad 2001, s.178-183.
3. Chybowski L., Grzebieniak R., *Oszacowanie niegotowości systemu chłodzenia wodą morską elektrowni głównych statku pozycjonowanego dynamicznie z wykorzystaniem szczególnych algorytmów*. Materiały XXVI Sympozjum Siłowni Okrętowych, AMW Gdynia 2005, s. 38-48.
4. Chybowski L., Kijewska M., Niecewicz G., *Analiza obciążeń autonomicznych urządzeń prądotwórczych systemów energetycznych obiektów pływających*. Materiały II Międzynarodowej Konferencji - Systemy Wspomagania w Zarządzaniu

- Środowiskiem Zuberec 2005. *Ekonomika i Organizacja Przedsiębiorstwa* Nr 7 (666) / 2005. Wydanie na CD-ROM. WOiZ Politechnika Śląska w Gliwicach 2005.
5. Chybowski L., Matuszak Z., *Podstawy analizy jakościowej i ilościowej metody drzewa niezdatności*. Zeszyty Naukowe nr 1 (73) Akademii Morskiej w Szczecinie, Explo-Ship 2004, Akademia Morska, Szczecin 2004, s. 129-144.
 6. Grzebieniak R., Chybowski L., *Testy diagnostyczne, grafy wiązań i równania stanu jako narzędzia oceny stanu technicznego urządzeń*. Zeszyty Naukowe nr 5 (77) Akademii Morskiej w Szczecinie, Obsługiwanie Maszyn i Urządzeń Okrętowych OMiUO 2005, Akademia Morska, Szczecin 2005, s. 247-255.
 7. Matuszak Z., *Wybrane zagadnienia bezpieczeństwa siłowni okrętowej*. Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie, Szczecin 1996, Studia nr 25.
 8. Matuszak Z., *Modeli otkazow i prinadleznost danych ob otkazach k generalnoj sowokupnosti na primierie sudowych energeticzeskich ustanowok*. Kaliningradskij gosudarstwienyj techniczeskij uniwersytet, Kaliningrad 2002, Monografia.
 9. Matuszak Z., Surma T., *Drzewo niezdatności i elementy algebry Boole'a jako sposób oceny niezawodności i diagnozowania instalacji siłowni okrętowej*. Materiały XVI Sesji Naukowej Okrętowców, Szczecin - Dziwnówek 1994. Wyd. Stoczni Szczecińskiej S.A., Szczecin 1994, cz. II, s. 69-76.
 10. 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.
 11. Studziński K., *Zastosowanie metody drzew uszkodzeń do analizy wybranych systemów siłowni okrętowej statku*. Praca inżynierska. Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin 2004, maszynopis powielany.

**Leszek Chybowski,
Zbigniew Matuszak,
Krzysztof Studziński**
Szczecin, Poland

FAULT TREE METHOD APPLICATION FOR OPERATION ANALYSIS OF SELECTED MARINE POWER PLANT SYSTEMS INSTALLED ONBOARD PASSENGER-CAR FERRY

Application of Fault Tree method for operation analysis of marine power plant systems based on passenger-car ferry example, in general outline has been presented. Basic issues connected with qualitative evaluation and selected quantitative system measures, used in Fault Tree Analysis have been shown. Selected marine power plant systems installed onboard passenger-car ferry and their models as Fault Tree diagrams have been described. Particular trees in the form of Boolean models have been shown.

**Leszek Chybowski,
Zbigniew Matuszak,
Krzysztof Studziński**
Szczecin, Polska

ZASTOSOWANIE ANALIZY DRZEWA NIEZDATNOŚCI DO OCENY PRACY WYBRANYCH SYSTEMÓW SIŁOWNI OKRĘTOWEJ PROMU PASAŻERSKO-SAMOCHODOWEGO

Materiał przedstawia w ogólnym ujęciu zastosowanie metodyki analizy drzewa niezdatności do oceny pracy systemów siłowni okrętowej na przykładzie promu pasażersko-samochodowego. Przedstawiono podstawowe zagadnienia dotyczące analizy jakościowej oraz wybrane miary ilościowe wykorzystywane w metodzie drzew niezdatności. W pracy przedstawiono wybrane systemy siłowni okrętowej promu pasażersko-samochodowego, dla których zbudowano modele w formie drzew niezdatności. Poszczególne modele zostały opisane oraz przedstawione w formie równań boolowskich.