

**ZESZYTY NAUKOWE NR 1(73)  
AKADEMII MORSKIEJ  
W SZCZECINIE**

---

**EXPLO-SHIP 2004**

---

Leszek Chybowski, Zbigniew Matuszak

**Symulacja niegotowości systemu siłowni okrętowej  
oparta na drzewie niezdatności**

Słowa kluczowe: system energetyczno-napędowy statku, drzewo niezdatności, symulacja niegotowości systemu siłowni

*Na przykładzie systemu energetyczno-napędowego statku wspomagającego eksploatację dna morskiego dokonano symulacji niegotowości tego systemu. Analizę wykonano opierając się na drzewie niezdatności metodą aproksymacji kresu górnego i algorytmem dokładnej kalkulacji.*

**A Simulation of the Unavailability of Marine Power  
Plant System Based on the Fault Tree**

Key words: ship power-propulsion system, fault tree, simulation of power plant unavailability

*The power-propulsion system of a ship exploring seabed was used for a simulation of the unavailability of the system. The analysis was performed on the basis of a fault tree by the upper limit approximation and with the use of the accurate calculation algorithm.*

## Wprowadzenie

Morza i oceany stanowią przeważającą część powierzchni naszej planety i są środowiskiem pracy statków transportowych i rybackich, a także różnych obiektów oceanotechnicznych takich jak: platformy wiertnicze, wydobywcze, statki wspierające operacje wydobywania ropy naftowej oraz gazu ziemnego, które to surowce stanowią podstawowe źródło energii dla cywilizacji ludzkiej. Bezpieczeństwo żeglugi oraz eksploatacji wszystkich tych obiektów jest bardzo istotne ze względu na potencjalną możliwość spowodowania katastrofy ekologicznej, np. wywołaną wyciekami produktów ropopochodnych do środowiska morskiego. Inną kwestią jest ryzyko utraty zdrowia i życia załóg i pasażerów statków, a także utrata znacznej wartości mienia materialnego. Wszystkie te czynniki koncentrują się zwłaszcza wokół statków oceanotechnicznych, które ze względu na dużą liczebność załóg (często kilkaset osób), a także specyfikę wykonywanych prac wymagają bardzo obostrzonej kontroli pod względem bezpieczeństwa i niezawodności ich pracy.

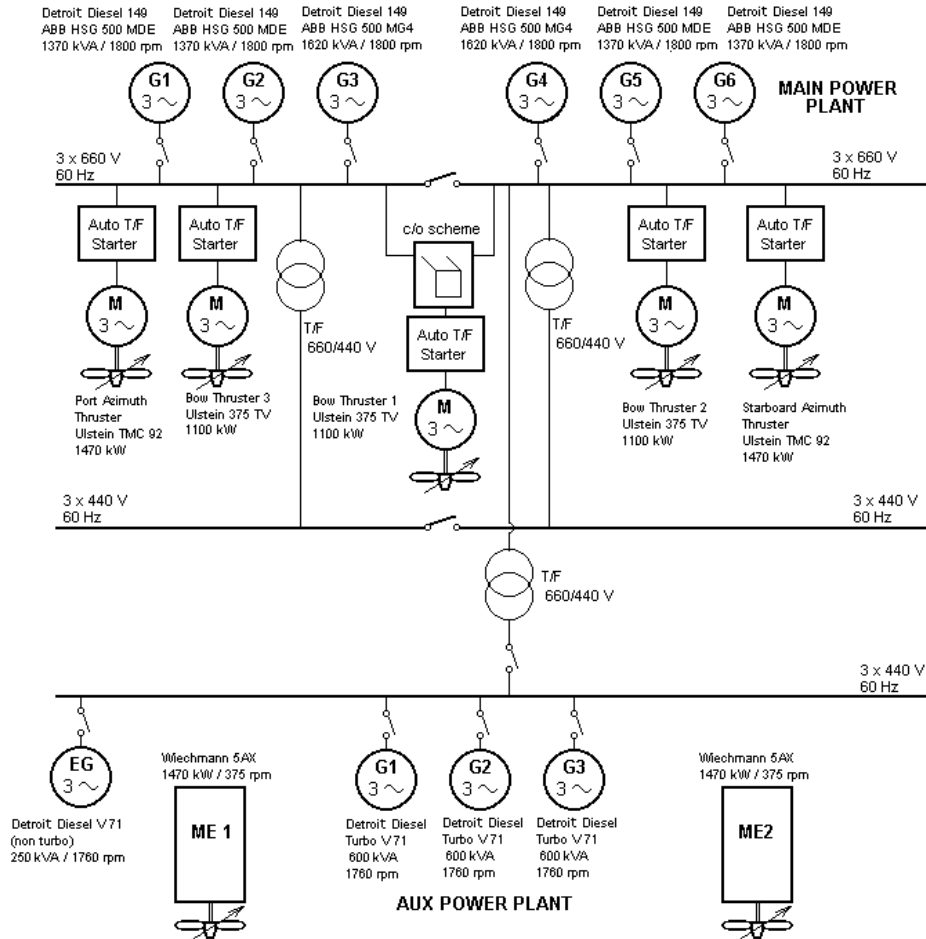
W prezentowanym artykule dokonano próby oszacowania niegotowości jednego z systemów siłowni okrętowej statku wspomagającego eksplorację dna morskiego, wykorzystując drzewo uszkodzeń tego systemu i metodę aproksymacji górnego kresu oraz metodę opartą na algorytmie dokładnej kalkulacji. W symulacji niegotowości wykorzystano *model klasyczny*, w którym zdarzenia elementarne opisano z użyciem stałej wartości funkcji niegotowości operacyjnej elementów. Wartości prawdopodobieństwa przejścia elementów w stan niezdatności oszacowano w odniesieniu do odpowiednich czasów ich wymaganej pracy *model czasowozależny*, w którym proces zużycia elementów jest opisany rozkładem wykładniczym. Parametrem charakterystycznym rozkładu jest stała wartość funkcji intensywności uszkodzeń ( $\lambda$ ). Wartości funkcji intensywności uszkodzeń dla poszczególnych elementów oszacowano na podstawie obserwacji chwil zaistnienia stanów niezdatności, a w sytuacji braku danych z badań eksploatacyjnych na podstawie danych literaturowych.

### 1. Charakterystyka obiektu analizy

Analizę przeprowadzono na przykładzie siłowni wielozadaniowego statku oceanotechnicznego MSV *Seaway Kestrel*, wspomagającego eksplorację dna morskiego, wykonującego głównie prace konstrukcyjne na instalacjach podwodnych obiektów wydobywczych i przetwórczych ropy naftowej i gazu ziemnego. Jednostka jest wyposażona w system dynamicznego pozycjonowania (ang. *DP System*) typu *Simrad ADP 703* z rezerwowym systemem *ADP 701*. Podczas

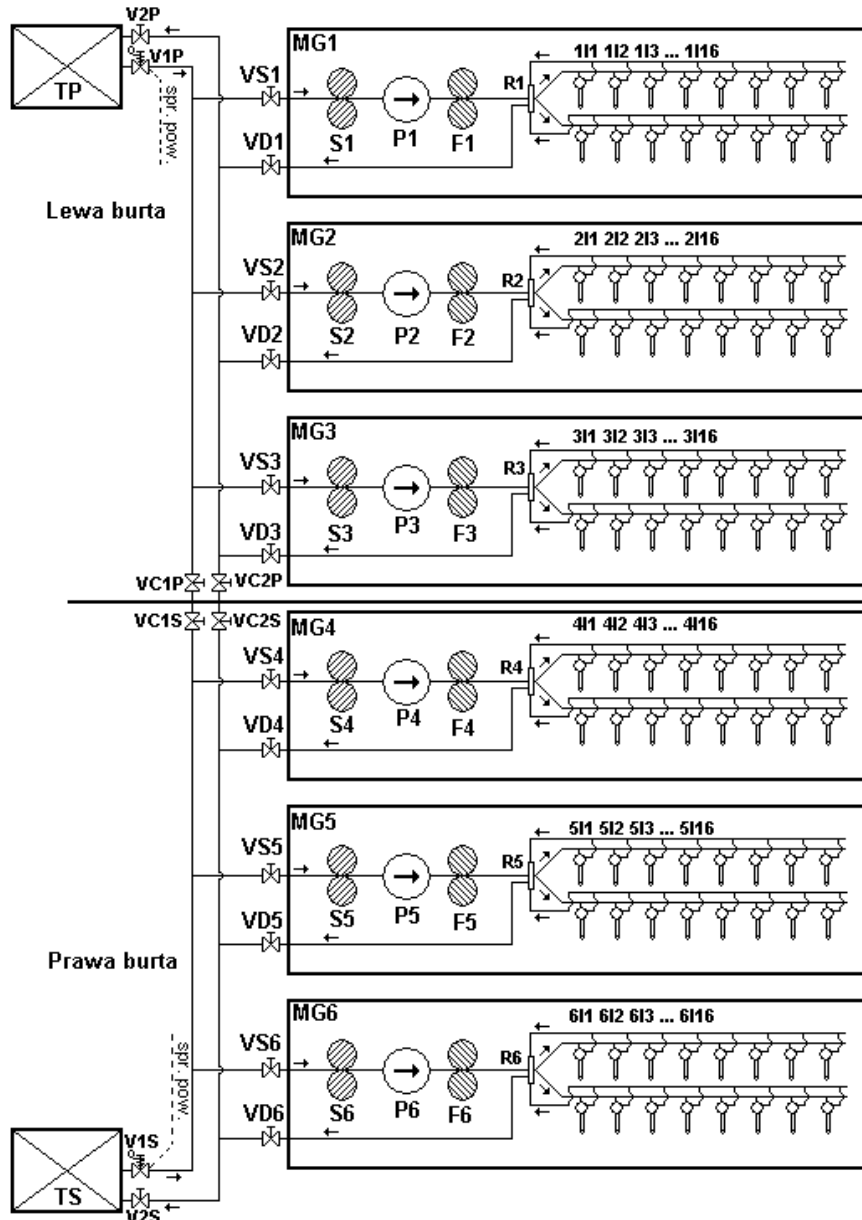
pracy statku z systemem *DP*, jest wykorzystywany układ napędowy złożony z dwóch azymutalnych pędników rufowych typu *Ulstein TMC92* o mocy znamionowej 1470 kW każdy oraz trzech dziobowych sterów strumieniowych *Ulstein 375 TV* o mocy znamionowej 1100 kW każdy. Statek pod względem konstrukcji, wyposażenia oraz działania odpowiada trzeciej, najwyższej klasie konsekwencji, określającej znaczenie jednostki pozycjonowanej dynamicznie (ang. *Consequence Class 3*). Jednostka jest wyposażona w trzy przedziały maszynowe: oryginalną siłownię rufową oraz dwie później zbudowane siłownie dziobowe [5, 6]. Podstawowe wyposażenie siłowni rufowej stanowią: dwa silniki napędu głównego typu *Wichman 5AX* (o mocy znamionowej 1000 kW każdy) napędzające dwie śruby o zmiennym skoku przez sprzęgło pneumatyczne; trzy pomocnicze zespoły prądotwórcze z prądnicami typu *Delco E7092M3* napędzane silnikami *Detroit Diesel 16 V-71 Turbo*, każdy o mocy 380 kW przy 1760 obr/min, zasilające oryginalną „starą” magistralę 440 V, zlokalizowaną w Centrali Manewrowo-Kontrolnej; napędzany silnikiem spalinowym *Detroit Diesel 16 V-71* rufowy tunelowy ster strumieniowy (ang. *skeg thruster*). Praca wszystkich silników siłowni rufowej jest zapewniona przez działanie integralnych i niezależnych systemów pomocniczych zlokalizowanych w tym przedziale. Stosownie do wymagań prowadzenia operacji oceanotechnicznych w trzeciej klasie konsekwencji, zapewniono niezależność pracy wszystkich przedziałów maszynowych, a wszystkie systemy pomocnicze w każdym z nich mogą działać niezależnie. Siłownie dziobowe zlokalizowano w dwóch odseparowanych przedziałach odpowiednio na prawej i lewej burcie. Obie siłownie są wzajemnie niezależne i posiadają własne autonomiczne instalacje pomocnicze: paliwową, oleju smarnego, wody chłodzącej, powietrza rozruchowego oraz niezależne źródła zasilania. Każda z siłowni dziobowych jest wyposażona w trzy główne zespoły prądotwórcze: dwa główne generatory prądotwórcze *ABB HSG 500 MDE* o mocy znamionowej 1370 kVA przy 1800 obr/min każdy, napędzane silnikami *Detroit Diesel 149*; jeden główny generator prądotwórczy *ABB HSG 500 MG4* o mocy znamionowej 1620 kVA przy 1800 obr/min, napędzany silnikiem *Detroit Diesel 149*.

Uproszczony schemat systemu energetyczno-napędowego przedstawiono na rysunku 1. System ten dla pozycjonowanego dynamicznie statku oceanotechnicznego oraz jego podstruktury, m.in. pomocnicze instalacje siłowni okrętowych, znacznie odbiegają pod względem konstrukcji od systemów stosowanych na statkach transportowych ze względu na bardzo wysoki poziom rezerwowania w postaci nadmiaru strukturalnego, funkcjonalnego oraz rezerwowania rozdzielczego. Na rysunku 2 podano schemat systemu zasilania paliwem silników elektrycznej, który był przedmiotem analizy.



Rys. 1. Schemat systemu energetyczno-napędowego statku DSV „Seaway Kestrel”  
 Fig. 1. The power-propulsion system of the "Seaway Kestrel"

Obserwację i rejestrację uszkodzeń urządzeń i systemów siłowni okrętowej prowadzono w czasie trzech lat eksploatacji. Ze względu na wysoki poziom rezerwowania oraz procedury eksploatacyjne wymuszające częstą kontrolę stanu technicznego maszyn i urządzeń, liczba zaobserwowanych stanów niezdatności była niska. Dla elementów o bardzo wysokiej niezawodności przyjęto w dalszych analizach wartości intensywności uszkodzeń oraz niegotowości operacyjnej, na podstawie dalej cytowanej literatury z uwzględnieniem specyficznych warunków eksploatacji.



Rys. 2. Schemat systemu zasilania paliwem silników elektrowni głównej  
Fig. 2. The fuel system of the power-propulsion system

## 2. Zastosowanie drzewa niezdatności do analizy systemu zasilania paliwem silników elektrowni głównej

Elementy każdej instalacji siłowni podlegają okresowym przeglądom oraz kontrolom, stosownie do wymagań producentów urządzeń, towarzystw klasyfikacyjnych oraz zaleceń armatora. Rodzaje czynności eksploatacyjnych oraz odpowiednie długości okresów pomiędzy przeglądami dla instalacji zasilania paliwem silników generatorów głównych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Zestawienie zalecanych okresów pomiędzy planowanymi czynnościami obsługowymi elementów instalacji zasilania paliwem silników generatorów głównych  
*Recommended periods between planned maintenance work for fuel system elements of the generating set engines*

Element	Rodzaj obsługi	Okres pomiędzy kontrolami
Pompa podająca	Wymiana elementu na nowy (w ramach przeglądu generalnego)	12 000 h*
Pompowtryskiwacze	Regulacja statyczna (ustawienie luzów)	3 000 h*
	Wymiana pompowtryskiwaczy	6 000 h*
Filtry zgrubne	Czyszczenie	500 h*
Filtry dokładnego oczyszczania	Wymiana wkładów filtracyjnych	500 h*
Rurociągi i zawory	Dokładna kontrola armatury	12 miesięcy
Rurociągi i zawory	Codzienna kontrola pracy instalacji	24 h
Zbiorniki rozchodowe	Odwadnianie, oględziny zewnętrzne oraz kontrola poziomu i transport paliwa	24 h
	Przeгляд według przepisów towarzystwa klasyfikacyjnego (kontrola wewnętrzna na obecność uszkodzeń struktury zbiornika)	60 miesięcy

\* – czas czynnej pracy danego silnika.

Przeгляdy elementów aktywnych (m.in. pomp) prowadzono według czasu ich czynnej eksploatacji (na podstawie liczników czasów pracy), natomiast pozostałych elementów systemu według czasu kalendarzowego. Ze względu na specyfikę pracy siłowni okrętowej opisywanego statku, czasy pomiędzy przeglądami mogą odbiegać od zaleceń, na co główny wpływ mają następujące czynniki: okresowe wyłączenie z pracy jednej z siłowni (np. podczas postoju statku w porcie); różna ilość i konfiguracja pracujących głównych zespołów

prądowórczych; specyfika pracy wykorzystywanej wersji komputerowego systemu *Amos* dla wspomaganie planowania prac obsługowych maszyn i urządzeń (liczniki czasu pracy elementów aktywnych są aktualizowane w okresach miesięcznych); przesunięcie określonego przeglądu przez załogę siłowni z powodu zaistnienia specyficznych okoliczności związanych z koniecznością usunięcia innych, poważniejszych awarii; niemożliwość wykonania określonego przeglądu ze względu na procedury dotyczące pracy siłowni z systemem dynamicznego pozycjonowania (np. podczas wykonywania prac nurkowych); brak możliwości technicznych usunięcia określonych uszkodzeń (np. brak części zamiennych); niekorzystne warunki hydrometeorologiczne, uniemożliwiające wykonanie pewnych czynności (sztorm).

W tabelach 2 i 3 zaprezentowano przyjęte wartości intensywności uszkodzeń elementów instalacji zasilania paliwem silników generatorów głównych. Na podstawie danych zawartych w tabelach 2 i 3 wyznaczono niegotowości operacyjne elementów systemu zasilania paliwem silników głównych zespołów prądowórczych dla odpowiednich czasów misji. Oszacowane wartości niegotowości operacyjnej dla analizowanego systemu przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 2

Zestawienie przyjętych wartości intensywności uszkodzeń elementów systemu zasilania paliwem silników generatorów głównych. Ciągły proces zużycia  
*The adopted values of failure intensity of fuel system elements of the generating set engines. Continuous wear process*

Element	Parametr $\lambda$ rozkładu wykładniczego		Uwagi
	[uszk./h]	[uszk./ 10 <sup>6</sup> h]	
Pompy podające	$5,00 \cdot 10^{-6}$	5	Uszkodzenie podczas pracy (przyjęto na podstawie [4])
Bloki rozdzielcze	$3,00 \cdot 10^{-6}$	3	Nieszczelność, zanieczyszczenie bloku rozdzielczego podczas pracy (przyjęto na podstawie [4])
Pompowtryskiwacze	$5,54 \cdot 10^{-6}$	5,54	Uszkodzenie pompowtryskiwacza podczas pracy (na podstawie zarejestrowanych uszkodzeń pompowtryskiwaczy silników <i>Detroit Diesel 149</i> )
Filtry zgrubne	$4,17 \cdot 10^{-4}$	416	Zanieczyszczenie filtra podczas pracy (jedna niezdatność/2400 h pracy silnika – na podstawie obserwacji)
Filtry dokładnego oczyszczania	$4,17 \cdot 10^{-4}$	416	Zanieczyszczenie filtra podczas pracy (jedna niezdatność/2400 h pracy silnika – na podstawie obserwacji)

Tabela 3

Zestawienie przyjętych wartości intensywności uszkodzeń elementów systemu zasilania paliwem silników generatorów głównych. Działanie na żądanie  
*The adopted values of failure intensity of fuel system elements of the generating set engines. Operation on request*

Element	Parametr $\lambda$ rozkładu wykładniczego	Uwagi
	[uszk./żądanie]	
Zawory	$1,00 \cdot 10^{-4}$	Uszkodzenie zaworu, niedrożność, pozostał w pozycji zamkniętej na żądanie otwarcia (na podstawie [4])
Zbiorniki rozchodowe	$1,00 \cdot 10^{-7}$	Uszkodzenie zbiornika, nieuszczelnienie spawu, brak paliwa w zbiorniku w chwili żądania poboru (na podstawie [4])

Tabela 4

Oszacowane wartości niegotowości operacyjnej elementów systemu zasilania paliwem silników głównych zespołów prądotwórczych  
*Estimated values of operational non-preparedness of fuel system elements of the generating set engines*

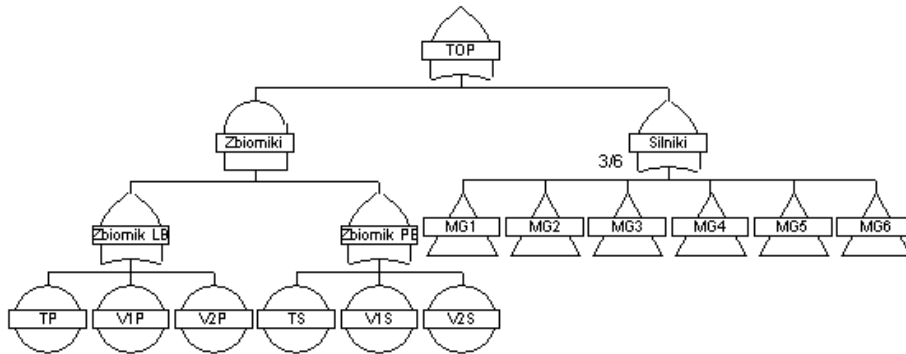
Element	Niegotowość elementu	
	Czas misji 500 h	Czas misji 6000 h
Pompy podające	2,50E-03	3,00E-02
Bloki rozdzielcze	1,50E-03	1,80E-02
Pompowtryskiwacze	2,77E-03	3,32E-02
Filtry zgrubne	2,09E-01	2,09E-01*
Filtry dokładnego oczyszczania	2,09E-01	2,09E-01*

\* dla filtrów (z wyjątkiem analiz porównawczych) przy symulacji dla 6000 h przyjęto czas misji 500h dla modelu stałego prawdopodobieństwa, a dla symulacji modelem czasowo zależnym przyjęto, że filtry są opisane jako elementy naprawialne.

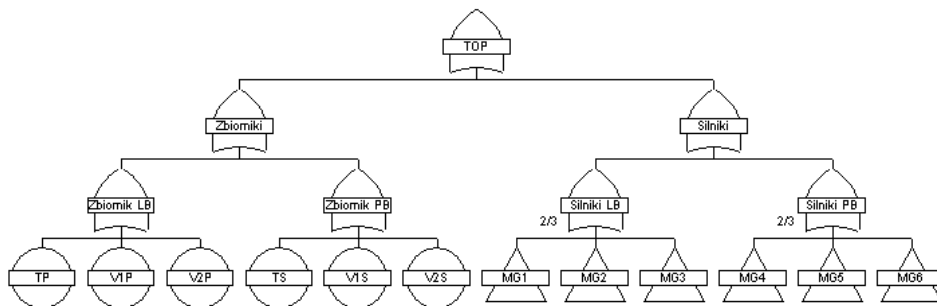
Dla systemu paliwowego sporządzono dwa drzewa niezdatności odpowiadające stanom eksploatacyjnym statku, dla siłowni głównych pracujących z otwartymi zaworami rozdzielającymi przedziały na wszystkich instalacjach – siłownie połączone (tryb pracy możliwy do zastosowania w czasie podróży morskiej lub postoju statku w porcie) i z zamkniętymi zaworami rozdzielającymi przedziały – siłownie rozdzielone (tryb pracy obligatoryjnie wymagany przy operacjach na DP z trzecią klasą konsekwencji). Drzewa te zaprezentowano



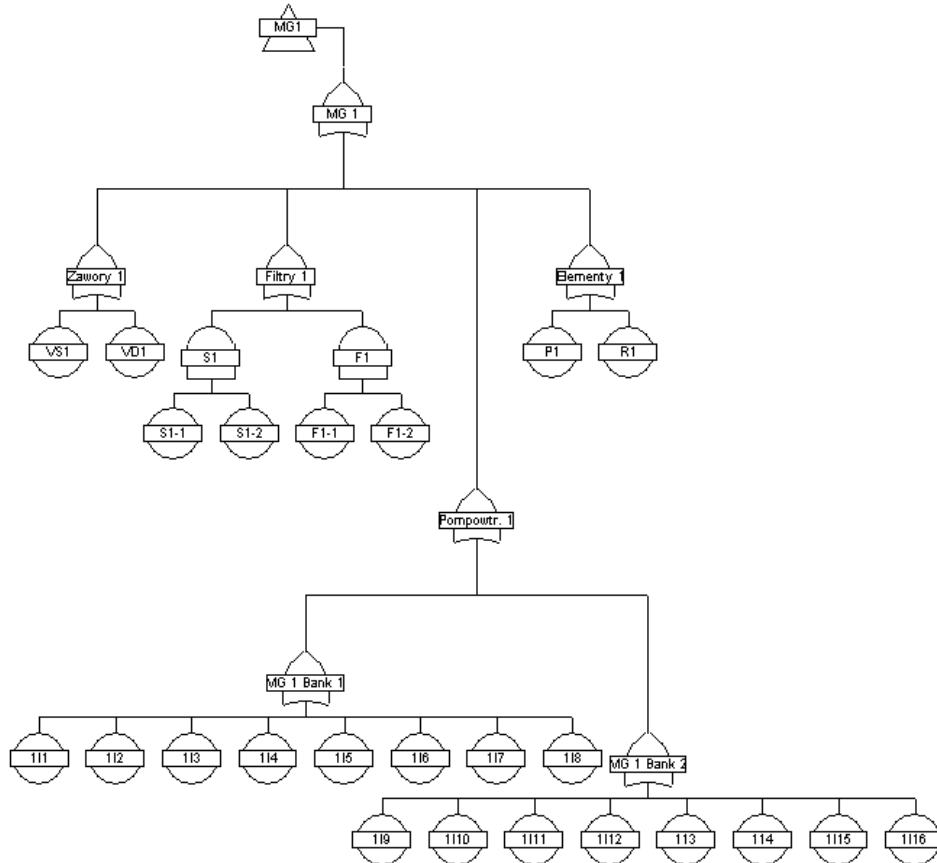
odpowiednio na rysunkach 3 oraz 4. W obu modelach w celu zwiększenia czytelności wprowadzono symbole przeniesień (identyczne w obu modelach), symbolizujące uszkodzenia instalacji paliwowych przypisanych do odpowiednich silników głównych generatorów prądowców, oznaczonych numerami od 1 do 6 (transfery: MG1, MG2, MG3, MG4, MG5, MG6). Poddrzewo odpowiadające przeniesieniu dla silnika nr 1 przedstawiono na rysunku 5, dla pozostałych silników poddrzewa przeniesień prezentują się podobnie, jedyną różnicą jest inna, odpowiednio do nr silnika, numeracja poszczególnych elementów składowych instalacji.



Rys. 3. Drzewo uszkodzeń dla instalacji zasilania paliwem silników głównych zespołów prądowców – zawory rozdzielające siłownie w pozycjach otwartych  
 Fig. 3. A failure tree for the fuel system of the generating set engines – valves separating power plants are open



Rys. 4. Drzewo uszkodzeń dla instalacji zasilania paliwem silników głównych zespołów prądowców – zawory rozdzielające siłownie w pozycjach zamkniętych  
 Fig. 4. A failure tree for the fuel system of the main generating set engines – valves separating power plants are closed



Rys. 5. Drzewo uszkodzeń systemu paliwowego jednego z silników elektrowni głównej (poddrzewo przeniesienia instalacji lokalnej silnika na przykładzie MG1)

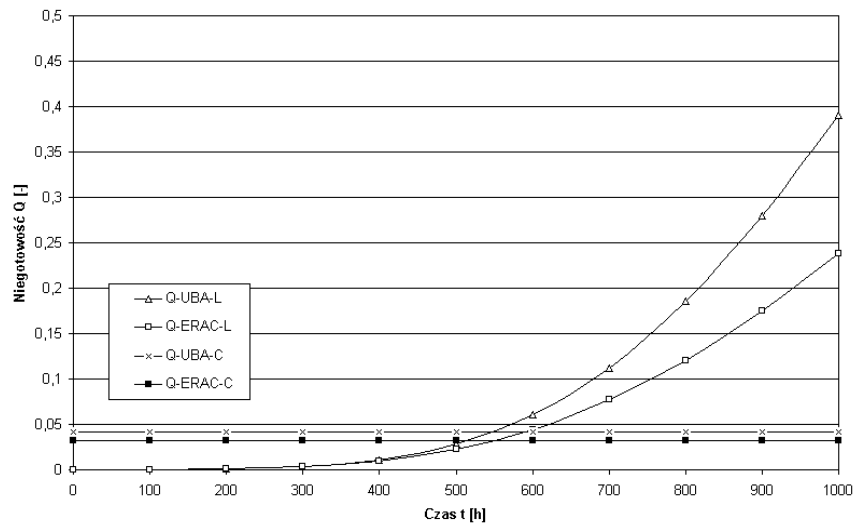
Fig. 5. A failure tree of the fuel system of an electric power plant engine (sub-tree of engine local installation – a case of MG1)

Na podstawie zbudowanych drzew wykonano analizę, wykorzystując jako wejściowe, dane zestawione w tabelach. Analizę oparto na programie *CARA* firmy *Sydvest* oraz arkuszach pracujących w środowisku *Microsoft Excel*. Podstawowym celem była symulacja oszacowania niegotowości systemu. Analizę przeprowadzono dwoma metodami: aproksymacji górnego kresu (*UBA*) [6] oraz metodą opartą na algorytmie dokładnej kalkulacji (*ERAC*) [1].

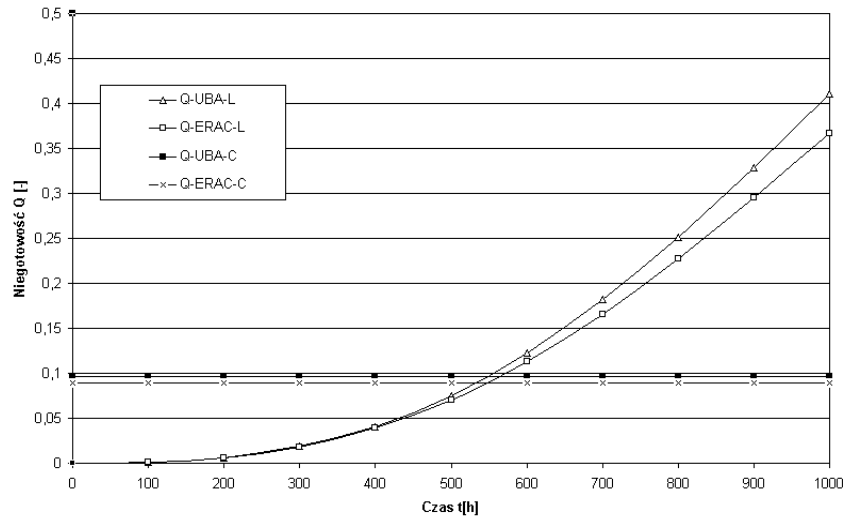
Symulacje przeprowadzono przy założeniu: pełnej zdatności systemu w chwili rozpoczęcia obserwacji; klasyfikacji jako nienaprawialne wszystkich elementów, których czas pomiędzy planowanymi przeglądami odpowiada czasowi symulacji; wykładniczego rozkładu uszkodzeń elementów; przyjęcia na podstawie obserwacji czasu symulacji dla prac obsługowych 500 h oraz 6000 h,

odpowiednio jako równych 1000 h oraz 6500 h; niezależności zdarzeń; dopuszczalnego błędu analiz numerycznych dla algorytmu ERAC równego  $E_{ERAC} = 10^{-06}$ ; dokładności pomiaru 1 h; przyjęcia w symulacjach porównawczych dla symulacji braku obsługi bieżącej filtrów (filtry są elementami nienaprawialnymi), zaś dla symulacji wpływu przeprowadzenia obsług bieżących filtrów, że są one elementami naprawialnymi (czas odnowy filtrów wynosi 1 h), a w analizie dla stałej wartości prawdopodobieństwa przy symulacji dla 6000 h przyjęcia  $q_i$  filtrów jako wyznaczonych w odniesieniu do 500 h; dopuszczalnych wartości niegotowości systemu jako wartości odpowiadających czasom do wykonania obsług bieżących, narzuconych procedurami eksploatacyjnymi; wartości granicznych niegotowości systemu jako wartości odpowiadających czasom do wykonania obsług bieżących, powiększonych o czas do najbliższej obsługi serwisowej 500 h; przeprowadzenia symulacji w odniesieniu do obsług bieżących 500 i 6000 h dla długości czasu symulacji wynoszącej odpowiednio 1000 i 6500 h.

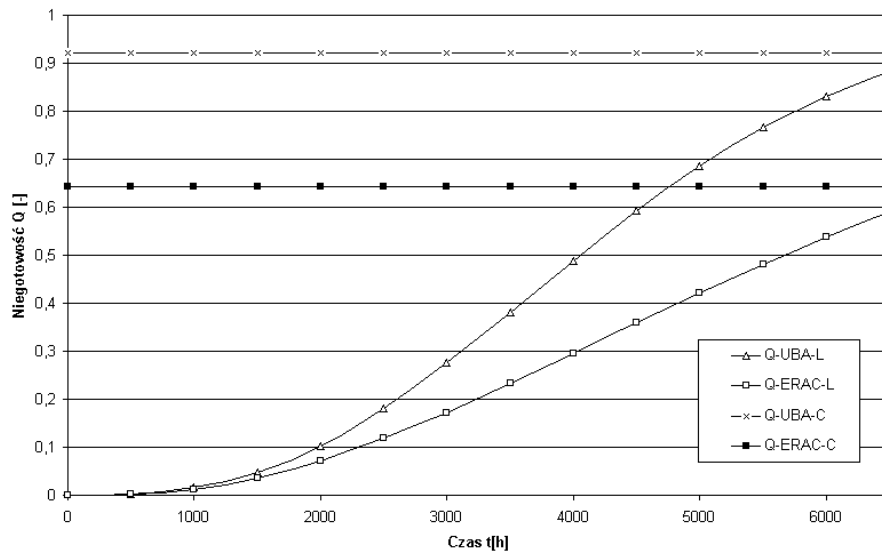
Na rysunkach 6 – 11 przedstawiono wyniki symulacji szacowania niegotowości analizowanego systemu metodami wcześniej opisanymi dla modelu czasozależnego ( $L$ ) i stałego prawdopodobieństwa ( $C$ ), odpowiednio oznaczając na rysunkach krzywe odpowiadające metodom i modelom.



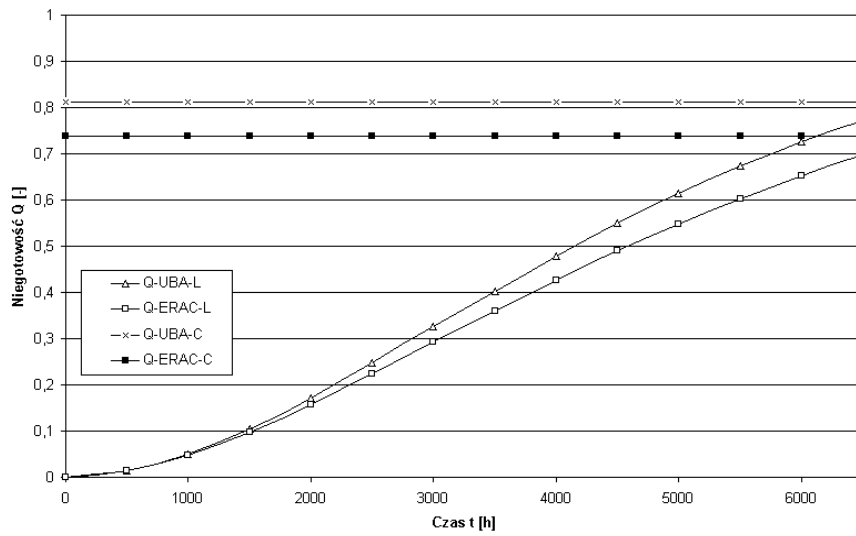
Rys. 6. Wyniki symulacji siłowni połączonych dla 500 h  
 Fig. 6. The results of connected power plants simulation for 500 hours



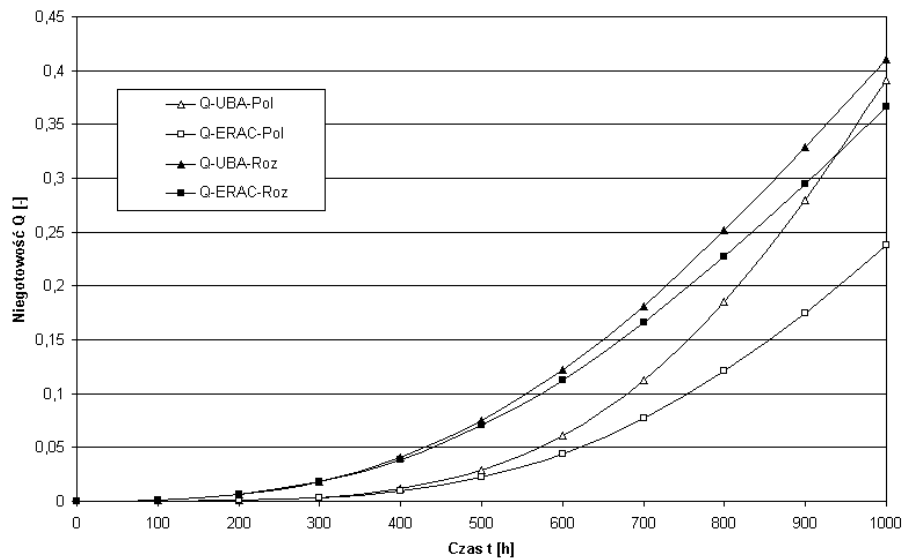
Rys. 7. Wyniki symulacji siłowni rozdzielonych dla 500 h  
 Fig. 7. The results of separated power plants simulation for 500 hours



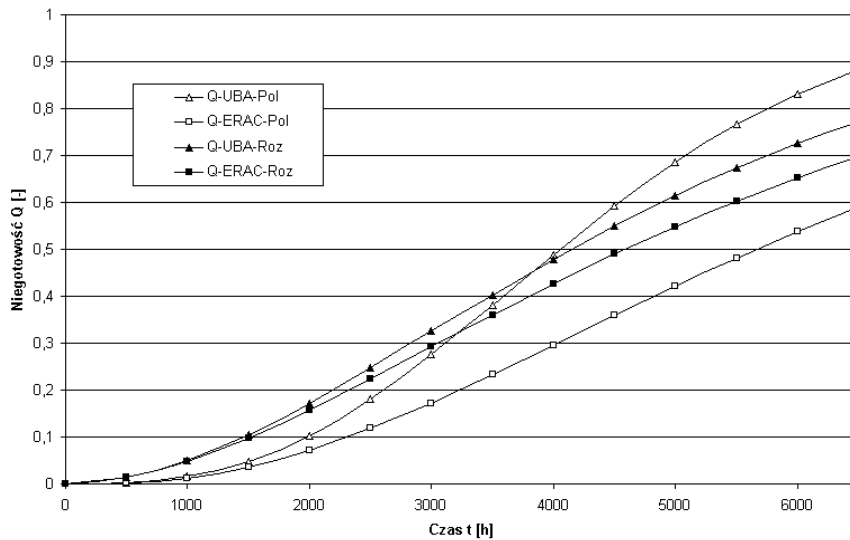
Rys. 8. Wyniki symulacji siłowni połączonych dla 6000 h  
 Fig. 8. The results of connected power plants simulation for 6000 hours



Rys. 9. Wyniki symulacji siłowni rozdzielonych dla 6000 h  
 Fig. 9. The results of separated power plants simulation for 6000 hours



Rys. 10. Wyniki symulacji wpływu połączenia siłowni dla 500 h  
 Fig. 10. The results of the effect of power plant connection for 500 hours



Rys. 11. Wyniki symulacji wpływu połączenia siłowni dla 6000 h  
 Fig. 11. The results of the effect of power plant connection for 6000 hours

## Uwagi końcowe

Zastosowanie modeli czasowozależnych pozwala na pełniejszy opis zachowania się obiektu i wierniejsze odwzorowanie zachowania się systemu w czasie eksploatacji. Zaprezentowane metody symulacji pozwalają na wygodną analizę zachowania systemu przy symulacji uszkodzeń pewnych elementów za pomocą doboru odpowiednich wartości parametrów opisujących zdarzenia. W dalszej części istnieje możliwość wykorzystania metody w proponowanym ujęciu (model czasowozależny) do badania wpływu rezerwowania na parametry gotowości systemu oraz symulowania stanów niezdatności w chwili rozpoczęcia obserwacji.

W przypadku posługiwania się w analizie danymi pochodzącymi z opisu obiektów podobnych, należy uwzględnić indywidualne cechy analizowanego obiektu (dla statków są to np. warunki hydrometeorologiczne, które oddziałują na statek, rejon pływania, zadania jakie statek wykonuje, rodzaj ładunku, wykształcenie personelu, itp.).

## **Literatura**

1. Aven, T., *Reliability/Availability Evaluations of Coherent Systems Based on Minimal Cut Sets*, Reliability Engineering Vol. 13, 1985, s. 93 – 104.
2. Ayyub B. M., *Guidelines for Probabilistic Risk Analysis of Marine Systems*, Report CBST-97-101. University of Maryland, College Park, May 1997.
3. CARA-Fault Tree Akademic version 4.1. Sydvest Software. Trondheim 1999.
4. Lungmen Units 1 & 2. Preliminary Safety Analysis Report. TEP. General Electric. Taiwan, 2000.
5. OREDA. Offshore Reliability Data Handbook. 3-rd Edition. Det Norske Veritas. Høvik. 1997.
6. Vesely W. E., Goldberg F. F., Roberts N. H., Haasl D. F., *Fault Tree Handbook*, NUREG-0492. U. S. Nuclear Regulatory Commission, Government Printing Office, Washington, January 1981.

*Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.*

## **Recenzenci**

prof. dr hab. inż. Jerzy Girtler  
dr hab. inż. Jerzy Listewnik, prof. AM

## **Adresy Autorów**

mgr inż. Leszek Chybowski  
Politechnika Szczecińska  
Wydział Mechaniczny  
al. Piastów 19, 70-310 Szczecin

dr hab. inż. Zbigniew Matuszak, prof. AM  
Akademia Morska w Szczecinie  
Instytut Technicznej Eksploatacji Siłowni Okrętowych  
ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin