

XXVI SYMPOZJUM SIŁOWNI OKRĘTOWYCH SYMSO 2005 GDYNIA

Leszek Chybowski, mgr inż.
Robert Grzebieniak, mgr inż.
Akademia Morska w Szczecinie
Instytut Technicznej Eksploatacji Siłowni Okrętowych

OSZACOWANIE NIEGOTOWOŚCI SYSTEMU CHŁODZENIA WODĄ MORSKĄ ELEKTROWNI GŁÓWNYCH STATKU POZYCJONOWANEGO DYNAMICZNIE Z WYKORZYSTANIEM SZCZEGÓLNYCH ALGORYTMÓW

STRESZCZENIE

W pracy rozpatruje się zagadnienie szacowania niegotowości wybranego systemu obsługującego elektrownię główną statku pozycjonowanego dynamicznie. Przedstawiono również sposób modelowania systemu na przykładzie systemu chłodzenia wodą morską elektrowni głównych. Następnie przedstawiono algorytm oszacowania niegotowości ww. systemu. Kończącą część artykułu uzupełniono o wyniki analizy oraz uwagi końcowe.

WSTĘP

Jedną z miar charakteryzujących systemy techniczne pod kątem gotowości do wykonania stawianych jej zadań w określonym czasie eksploatacji jest niegotowość. Przeprowadzono obserwacje oraz oszacowano przebiegi niegotowości wybranych systemów siłowni okrętowej wielozadaniowego pozycjonowanego dynamicznie statku oceanotechnicznego (rys. 1). Oszacowań dokonano dla systemów zasilania paliwem oraz chłodzenia wodą morską elektrowni głównej. Analiza niegotowości pierwszego z systemów została zaprezentowana w pracach [3, 4, 5]. Celem niniejszego artykułu jest prezentacja możliwości zastosowania szczególnych algorytmów analitycznych do innego systemu siłowni, który znacznie odbiega strukturą oraz poziomem złożoności od systemu paliwowego. Zarejestrowane chwile uszkodzeń w analizowanych systemach pozwoliły na oszacowanie intensywności uszkodzeń elementów i przeprowadzenie analiz ilościowych z wykorzystaniem szczególnych algorytmów. W sytuacji braku danych

o uszkodzeniach pewnych elementów posłużono się wartościami niegotowości zaczerpniętymi z pracy [11].



Rys. 1. Widok wielozadaniowego statku oceanotechnicznego

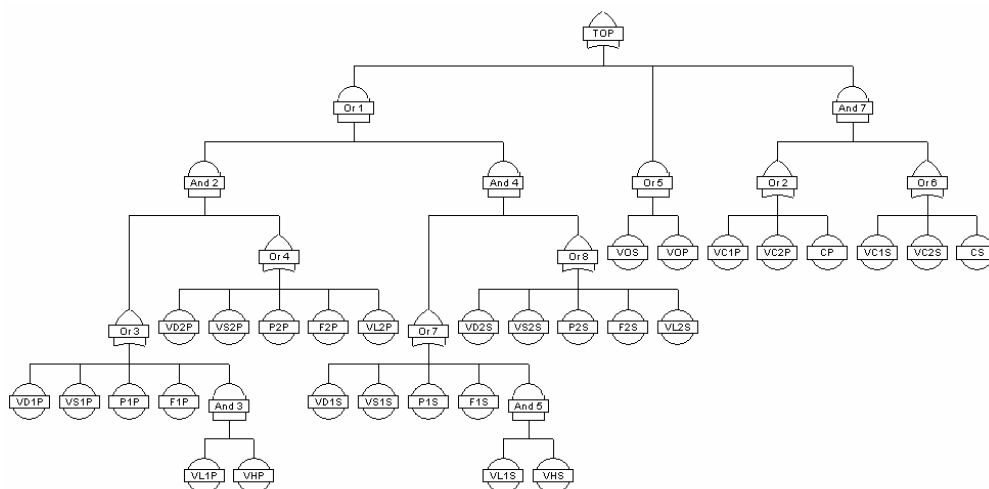
MODELOWANIE SYSTEMÓW

Każdy z dziobowych przedziałów maszynowych statku (elektrownie główne) posiada własne instalacje pomocnicze, w tym instalację zasilania paliwem oraz instalację chłodzenia. Instalacje w dwóch siłowniach mogą zostać połączone poprzez otwarcie odpowiednich zaworów, po dwa zawory rozdzielające na każdym rurociągu zbiorczym (po obu stronach grodzi rozdzielającej przedziały maszynowe). W tabeli 1 zestawiono oznaczenia elementów (zdarzeń) systemu. System chłodzenia wodą morską w różnych stanach pracy zamodelowane są różnymi drzewami niezdatności (rys. 2 i 3) z uwagi na inną strukturę funkcjonalną oraz niezawodnościową, co jest powiązane z inną konfiguracją współpracujących elementów w analizowanym systemie [6, 10]. Podczas podróży morskiej siłownie mogą pracować jako połączone (rys. 2).

Tab. 1. Opis zdarzeń dla systemu chłodzenia wodą morską

Symbol elementu	Nazwa elementu	Opis zdarzenia
VL1P	Zawór denny nr 1 LB	Zawór uszkodzony w pozycji zamkniętej
VL1S	Zawór denny nr 1 PB	Zawór uszkodzony w pozycji zamkniętej
VL2P	Zawór denny nr 2 LB	Zawór uszkodzony w pozycji zamkniętej
VL2S	Zawór denny nr 2 PB	Zawór uszkodzony w pozycji zamkniętej
VHP	Zawór burtowy LB	Zawór uszkodzony w pozycji zamkniętej
VHS	Zawór burtowy PB	Zawór uszkodzony w pozycji zamkniętej
VOP	Zawór odpływowy LB	Zawór uszkodzony w pozycji zamkniętej
VOS	Zawór odpływowy PB	Zawór uszkodzony w pozycji zamkniętej
VS1P	Zawór ssawny pompy nr 1 LB	Zawór uszkodzony w pozycji zamkniętej
VS1S	Zawór ssawny pompy nr 1 PB	Zawór uszkodzony w pozycji zamkniętej
VS2P	Zawór ssawny pompy nr 2 LB	Zawór uszkodzony w pozycji zamkniętej

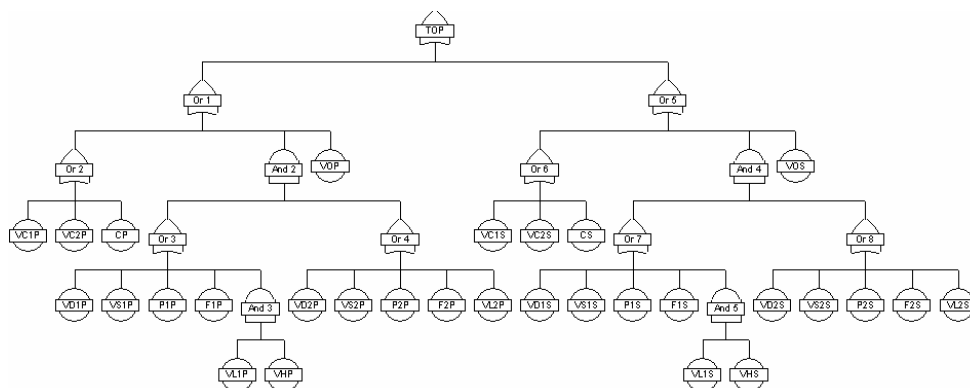
VS2S	Zawór ssawny pompy nr 2 PB	Zawór uszkodzony w pozycji zamkniętej
VD1P	Zawór tłoczny pompy nr 1 LB	Zawór uszkodzony w pozycji zamkniętej
VD1S	Zawór tłoczny pompy nr 1 PB	Zawór uszkodzony w pozycji zamkniętej
VD2P	Zawór tłoczny pompy nr 2 LB	Zawór uszkodzony w pozycji zamkniętej
VD2S	Zawór tłoczny pompy nr 2 PB	Zawór uszkodzony w pozycji zamkniętej
VC1P	Zawór na dopływie chłodnicy LB	Zawór uszkodzony w pozycji zamkniętej
VC1S	Zawór na dopływie chłodnicy PB	Zawór uszkodzony w pozycji zamkniętej
VC2P	Zawór na odpływie chłodnicy LB	Zawór uszkodzony w pozycji zamkniętej
VC2S	Zawór na odpływie chłodnicy PB	Zawór uszkodzony w pozycji zamkniętej
P1P	Pompa wody morskiej nr 1 LB	Uszkodzenie pompy podczas rozruchu / pracy
P1S	Pompa wody morskiej nr 1 PB	Uszkodzenie pompy podczas rozruchu / pracy
P2P	Pompa wody morskiej nr 2 LB	Niezadziałanie pompy na ządanie
P2S	Pompa wody morskiej nr 2 PB	Niezadziałanie pompy na ządanie
F1P	Filtr na ssaniu pompy nr 1 LB	Niedrożność filtra
F1S	Filtr na ssaniu pompy nr 1 PB	Niedrożność filtra
F2P	Filtr na ssaniu pompy nr 2 LB	Niedrożność filtra
F2S	Filtr na ssaniu pompy nr 2 PB	Niedrożność filtra
CP	Chłodnica centralna LB	Zanieczyszczenie chłodnicy / uszkodzenie uszczelnień
CS	Chłodnica centralna PB	Zanieczyszczenie chłodnicy / uszkodzenie uszczelnień



Rys. 2. Drzewo niezdatności dla instalacji chłodzenia wodą morską - siłownie połączone (opis w tekście)

Zgodnie z zasadami pracy statku stosownie do trzeciej klasy wyposażenia statków pozycjonowanych dynamicznie (najbardziej zaawansowane operacje oceanotechniczne) [7], współpraca siłowni w trakcie wykonywania prac konstrukcyjnych z dynamicznym pozycjonowaniem wymaga rozdzielania poszczególnych instalacji elektrowni głównych zarówno po stronie mechanicznej jak i elektrycznej (rys. 3), co powinno być dodatkowo potwierdzone poprzez wypełnienie odpowiedniej listy kontrolnej. Współpraca elektrowni z rozdzielonymi przedziałami zapewnia w przypadku zaistnienia awarii w wytwarzaniu i rozdziale energii elektrycznej w jednej z elektrowni, zachowanie częściowej funkcjonalności statku, a tym samym możliwość awaryjnego bezpiecznego zakończenia

wykonywanych prac i udanie się do strefy bezpiecznej (powyżej 500 m od struktur wiertniczo-wydobywczych ropy naftowej i gazu ziemnego). Współpraca elektrowni przebiega zgodnie z procedurami Międzynarodowego Stowarzyszenia Kontraktorów Morskich *IMCA* [8].



Rys. 3. Drzewo niezdatności dla instalacji chłodzenia wodą morską - siłownie rozdzielone (opis w tekście)

OSZACOWANIE NIEGOTOWOŚCI

Jednym z istotnych etapów analizy niezawodnościowej systemu jest proces wyznaczania przebiegów miar niezawodnościowych dla zdefiniowanej struktury oraz określonych charakterystyk uszkodzeń elementów systemu. Wykonanie obliczeń wymaga dobrania odpowiedniego algorytmu obliczeń [5, 9]. Punktem wyjścia wszystkich algorytmów jest wstępna analiza opisu (najczęściej graficznego) struktury niezawodnościowej celem konwersji jej do formy dogodnej dla wykonania obliczeń. Większość algorytmów wymaga znajomości wszystkich (dla uzyskania dokładnych wyników obliczeń) lub części (dla obliczeń przybliżonych) minimalnych ścieżek lub minimalnych przekrojów. W tym celu konieczne jest zastosowanie odpowiedniej metodyki generowania minimalnych ścieżek lub przekrojów. Dotychczas opracowana została duża liczba algorytmów głównie bazujących na minimalnych ścieżkach lub przekrojach. Można wyróżnić dwie główne grupy, tj. algorytmy analityczne i symulacyjne. Algorytmy analityczne będące narzędziem w prowadzonych badaniach mogą zostać podzielone na kilka głównych grup, a mianowicie:

- algorytmy włączeń i wyłączeń (*IE* – algorytmy), bazujące na znajomości minimalnych ścieżek lub minimalnych przekrojów systemu i wykorzystujące wzór Poincaré’go;
- algorytmy sum rozłącznych iloczynów (*SDP* – algorytmy) oparte na generowaniu struktury systemu jako sumy rozłącznych iloczynów;
- algorytmy faktoryzacji, zwane również algorytmami dekompozycji liniowej, wykorzystujące dekompozycję względem wybranego elementu;

- inne algorytmy bazujące na znajomości ścieżek lub przekrojów minimalnych, wykorzystujące np. metodykę oszacowań prawdopodobieństw, prawdopodobieństwo warunkowe, operacje na macierzach boolowskich, transformacje i dekompozycje grafów oraz modele Markowa.

Po wnikliwej analizie dostępnych metod obliczeniowych dokonano ich selekcji i wybrano do zastosowania dla szacowania niegotowości, szczególne algorytmy analityczne. Finalnie analizy dla wybranych systemów pracujących w różnych stanach eksploatacyjnych z wykorzystaniem różnych modeli uszkodzeń przeprowadzono z zastosowaniem dwóch algorytmów tj., aproksymacji górnego ograniczenia oraz algorytmu opartego na dokładnej kalkulacji gotowości. Systemy zamodelowano z zastosowaniem metodologii analizy drzew niezdatności.

Przekroje minimalne drzewa niezdatności modelującego dany system oznaczono przez C_1, C_2, \dots, C_n . Przy założeniu niezależności zdarzeń wejściowych, prawdopodobieństwo zaistnienia wszystkich wejść k -tego przekroju minimalnego C_k wynosi:

$$\check{Q}_k(t) = \prod_{i \in C_k} q_i(t) \quad (1)$$

Jeśli przekroje nie mają części wspólnej, czyli są statystycznie niezależne, to prawdopodobieństwo zaistnienia zdarzenia szczytowego wynosi:

$$Q_0(t) = 1 - \prod_{k=1}^n [1 - \check{Q}_k(t)] \quad (2)$$

Przeważnie warunek ten nie jest prawdziwy, w takim przypadku zawsze zachodzi nierówność:

$$Q_0(t) \leq 1 - \prod_{k=1}^n [1 - \check{Q}_k(t)] \quad (3)$$

Prawdopodobieństwo zaistnienia zdarzenia szczytowego $Q_0(t)$ jest w przybliżeniu równe prawej stronie powyższej nierówności (stąd nazwa metody: aproksymacja górnego ograniczenia). Błąd oszacowania jest mały, szczególnie dla q_i bliskich zero. Zależność, opisująca górne ograniczenie dla $Q_0(t)$ jest zwykle wystarczającym przybliżeniem rzeczywistej wartości $Q_0(t)$.

Jedną z bardziej rozpowszechnionych alternatyw jest algorytm *ERAC* (ang. *Exact Reliability/Availability Calculation* – dokładna kalkulacja niezawodności/gotowości) [1], w którym zakłada się, że drzewo niezdatności modelujące analizowany system złożone jest z n niezależnych zdarzeń wejściowych. $\bar{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ opisuje losowy wektor stanu zdarzeń wejściowych, gdzie y_i jest równe 1, gdy i -te zdarzenie zachodzi, zaś równe 0 w przeciwnym przypadku. A opisuje wszystkie stany \bar{y} drzewa niezdatności, dla których zachodzi zdarzenie szczytowe (ZS). Prawdopodobieństwo $Q_0(t)$ jest opisane wówczas następująco:

$$Q_0(t) = \sum_{\bar{y} \in A} P[\bar{Y}(t) = \bar{y}] \quad (4)$$

Jeśli:

$$P[Y_i(t) = 1] = q_i(t)$$

$$P[Y_i(t) = 0] = 1 - q_i(t) = p_i(t)$$

to:

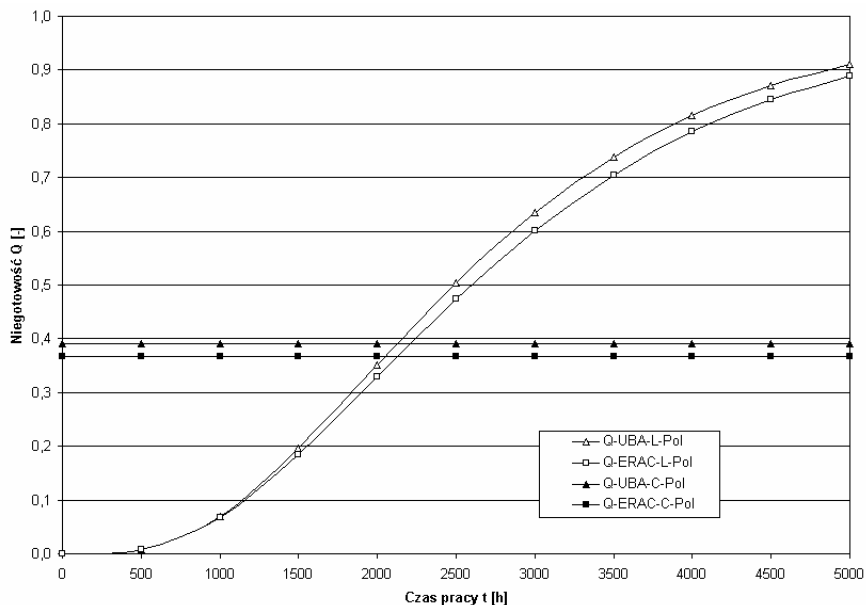
$$P[\bar{Y}(t) = \bar{y}] = \prod_{i=1}^n p_i(t)^{1-y_i} q_i(t)^{y_i} \quad (5)$$

Algorytm *ERAC* i wiele algorytmów pochodnych opiera się na formule (5).

WYNIKI ANALIZY

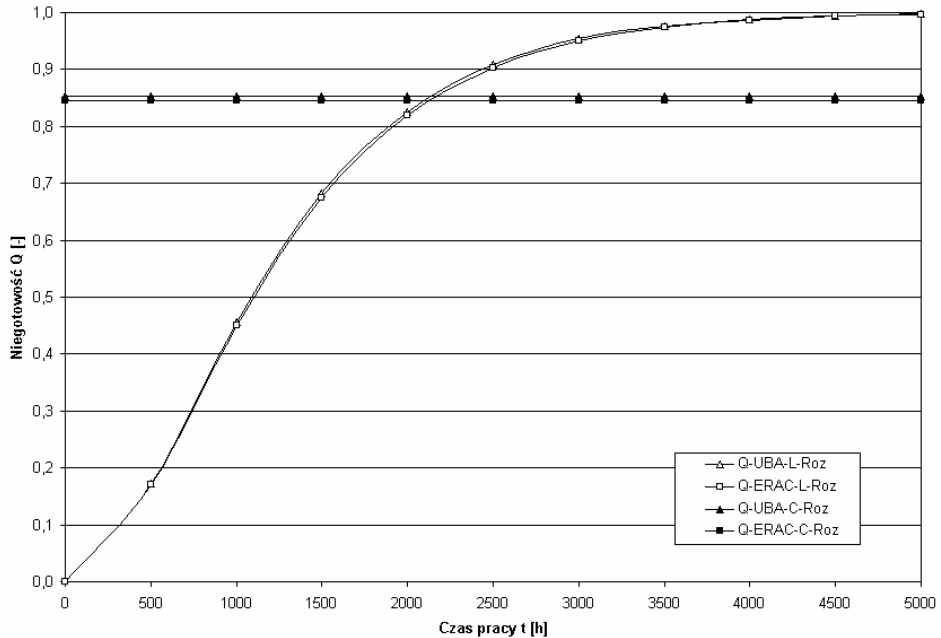
W oparciu o zaprezentowane drzewa uszkodzeń z wykorzystaniem danych o uszkodzeniach uzyskanych w wyniku trzech lat obserwacji statku w morzu przeprowadzono analizy przebiegu niegotowości systemu chłodzenia wodą morską elektrowni głównych. Kalkulacje przeprowadzono w odniesieniu do obsługi bieżącej 4300h (czas analizy 5000h), z użyciem dwóch różnych metod (aproksymacji górnego ograniczenia oraz algorytmu *ERAC*) dla dwóch różnych stanów pracy systemu. Wyniki analizy uzyskano z wykorzystaniem programu *CARA Fault Tree* w wersji akademickiej wyprodukowanego przez firmę Sydvest Software (Norwegia) [2]. Wybrane przebiegi oszacowanych niegotowości pokazano na rysunkach 4 i 5 oraz pokazano wpływ połączenia siłowni na rysunku 6.

Na rysunku 4 przedstawiono analizy dla systemu chłodzenia wodą morską dla siłowni połączonych w odniesieniu do obsługi bieżącej 4300h. Dwie krzywe oznaczone jako *UBA-L-Pol* oraz *ERAC-L-Pol* prezentują przebieg niegotowości z zastosowaniem opisu uszkodzeń modelem wykładniczym (czasowozależnym), odpowiednio dla analiz z wykorzystaniem aproksymacji górnego ograniczenia oraz algorytmu opartego na dokładnej kalkulacji gotowości. Dwie krzywe oznaczone jako *UBA-C-Pol* oraz *ERAC-C-Pol* dotyczą oszacowań z zastosowaniem modelu opisu zdarzeń stałym prawdopodobieństwem zaistnienia zdarzenia. Elementy o rewersie 2160h, zamodelowano tu jako naprawialne, przy jednoczesnym założeniu odnowy idealnej o czasie zerowym.



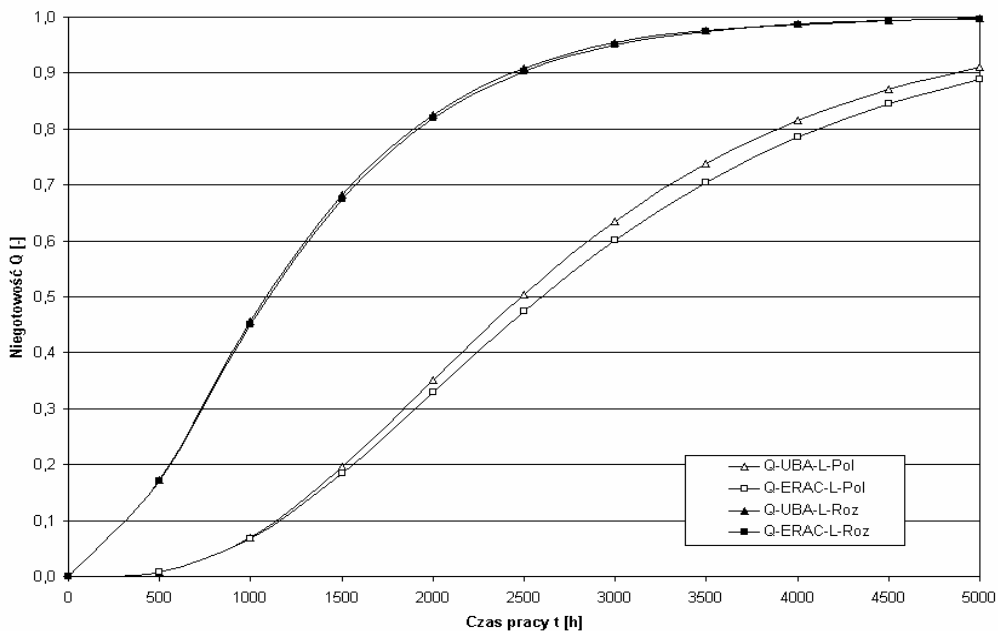
Rys. 4. Przebieg niegotowości, analiza w odniesieniu do obsługi 4300 h, siłownie połączone (opis w tekście)

Na rysunku 5 przedstawiono analizy dla systemu chłodzenia wodą morską dla siłowni rozdzielonych w odniesieniu do obsługi bieżącej 4300h. Dwie krzywe oznaczone jako *UBA-L-Roz* oraz *ERAC-L-Roz* prezentują przebieg niegotowości z zastosowaniem opisu uszkodzeń modelem wykładniczym (czasowozależnym), odpowiednio dla analiz z wykorzystaniem aproksymacji górnego ograniczenia oraz algorytmu opartego na dokładnej kalkulacji gotowości. Dwie krzywe oznaczone jako *UBA-C-Roz* oraz *ERAC-C-Roz* dotyczą oszacowań z zastosowaniem modelu opisu zdarzeń stałym prawdopodobieństwem zaistnienia zdarzenia. Mniejsze niż na rysunku 4 różnice w wynikach uzyskanych metodami UBA i ERAC wynikają z innej struktury systemu. Elementy o resursie 2160h zamodelowano tu jako naprawialne, przy jednoczesnym założeniu odnowy idealnej o czasie zerowym.



Rys. 5. Przebieg niegotowości, analiza w odniesieniu do obsługi 4300 h, siłownie rozdzielone (opis w tekście)

Na rysunku 6 przedstawiono porównanie wyników dla systemu chłodzenia wodą morską dla różnych stanów pracy elektrowni głównych. Dwie krzywe oznaczone jako *UBA-L-Roz* oraz *ERAC-L-Roz* prezentują przebieg niegotowości z zastosowaniem opisu uszkodzeń modelem wykładniczym (czasowozależnym) dla siłowni rozdzielonych odpowiednio z zastosowaniem aproksymacji górnego ograniczenia oraz algorytmu ERAC, natomiast oznaczone jako *UBA-L-Pol* oraz *ERAC-L-Pol* prezentują przebieg niegotowości z zastosowaniem opisu uszkodzeń modelem wykładniczym (czasowozależnym) dla siłowni połączonych odpowiednio z zastosowaniem aproksymacji górnego ograniczenia oraz algorytmu ERAC. Wyższe wartości funkcji niegotowości dla elektrowni rozdzielonych wynikają ze zmniejszenia poziomu rezerwowania (stopnia struktury progowej) w porównaniu z wynikami uzyskanymi dla siłowni połączonych.



Rys. 6. Wpływ połączenia siłowni na przebieg charakterystyk niegotowości systemu chłodzenia wodą morską (opis w tekście)

UWAGI KOŃCOWE

W wyniku zastosowania przedstawionych algorytmów możliwe jest oszacowanie niegotowości badanych systemów siłowni okrętowej z zastosowaniem opisu zdarzeń elementarnych modelem czasowozależnym oraz stałej wartości prawdopodobieństwa zaistnienia zdarzenia oraz porównanie wyników oszacowanych wartości niegotowości uzyskanych dla różnych stanów pracy systemów siłowni okrętowej;

Przewiduje się również, że metodyka rozwinięta w wyniku realizacji niniejszego projektu znajdzie zastosowanie praktyczne dla:

- wspomaganie personelu zarządzającego flotą armatora oraz inspektorów technicznych jako narzędzie oceny wdrażanych i będących w użyciu harmonogramów przeglądów maszyn i urządzeń okrętowych;
- wspomaganie operatorów siłowni okrętowych w postaci diagramów, wykresów, priorytetowych list sprawdzeń oraz procedur eksploatacyjnych tworzonych w oparciu o wyniki analiz niegotowości systemów.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. Aven, T., *Reliability/Availability Evaluations of Coherent Systems Based on Minimal Cut Sets*, Reliability Engineering 12, 1985, s. 93-104.
- [2]. *CARA-Fault Tree Academic version 4.1*. Sydvest Software. Trondheim 1999. <http://www.sydvest.com>

- [3]. Chybowski L., Matuszak Z., *Symulacja niegotowości systemu siłowni okrętowej oparta na drzewie niezdatności*. Zeszyty Naukowe nr 1 (73) Akademii Morskiej w Szczecinie, Explo-Ship 2004, Akademia Morska, Szczecin 2004, s. 145-159.
- [4]. Chybowski L., Matuszak Z., *Simulation of unavailability of the offshore unit's power plant system with use of selected algorithms*. Problems of Applied Mechanics. International Scientific Journal no 2 (15)/2004. IFToMM of Georgia. Tbilisi 2004, s. 33-47.
- [5]. Chybowski L., *Przydatność wybranych analitycznych algorytmów obliczeniowych niegotowości systemów siłowni okrętowych w metodzie drzew uszkodzeń*. Надежность и Эффективность Технических Систем. Международный Сборник Научных Трудов. KGTU, Kaliningrad 2004, s. 201-206.
- [6]. Chybowski L., *Szacowanie niegotowości wybranych systemów siłowni okrętowej obiektów pływających specjalnego przeznaczenia*. Materiały XXV Sympozjum Siłowni Okrętowych SymSO 2004. WOiO Politechnika Gdańska, Gdańsk 2004, s. 5-18.
- [7]. *Guidelines for Vessels with Dynamic Positioning Systems*. IMO MSC Circ. 645.
- [8]. *Guidelines for the Design & Operation of Dynamically Positioned Vessels*. IMCA M 103. February 1999.
- [9]. Karpiński J., Korczak E., *Metody oceny niezawodności dwustanowych obiektów technicznych*. Omnitech Press, Instytut Badań Systemowych PAN, 1990, s. 128-160.
- [10]. Nicewicz G., Grzebieniak R., *Rezerwowanie w systemie energetyczno-napędowym siłowni statku wiertniczego i statku transportowego*. Materiały 22 MSN, Zielona Góra, Maj 2001. Tom Mechanika, s. 13-18.
- [11]. *OREDA. Offshore Reliability Data Handbook. 3-rd Edition*. Det Norske Veritas. Høvik. 1997.