

Leszek CHYBOWSKI*
Zbigniew MATUSZAK*

Wybrane modele rezerwowania w elektrowniach statków z napędem spalinowo-elektrycznym

Paper presents selected issues of modeling of electric power generating system installed on board of offshore vessels with diesel-electric propulsion. Whole ship and electrical power generating system decomposition have been shown. Proposed by authors redundancy model utilizing of complex number plane have been presented as tool in marine power plant operation analysis. Based on the example offshore multi support vessel, applications of selected models have been shown. Marine power plant operation models as fault trees and Boolean equations models for different operation states of vessel electric power generating system have been presented. Some remarks on singletop fault tree and multitop fault tree models application in modeling of marine electric power plant systems installed on board diesel-electric propelled ships have been done.

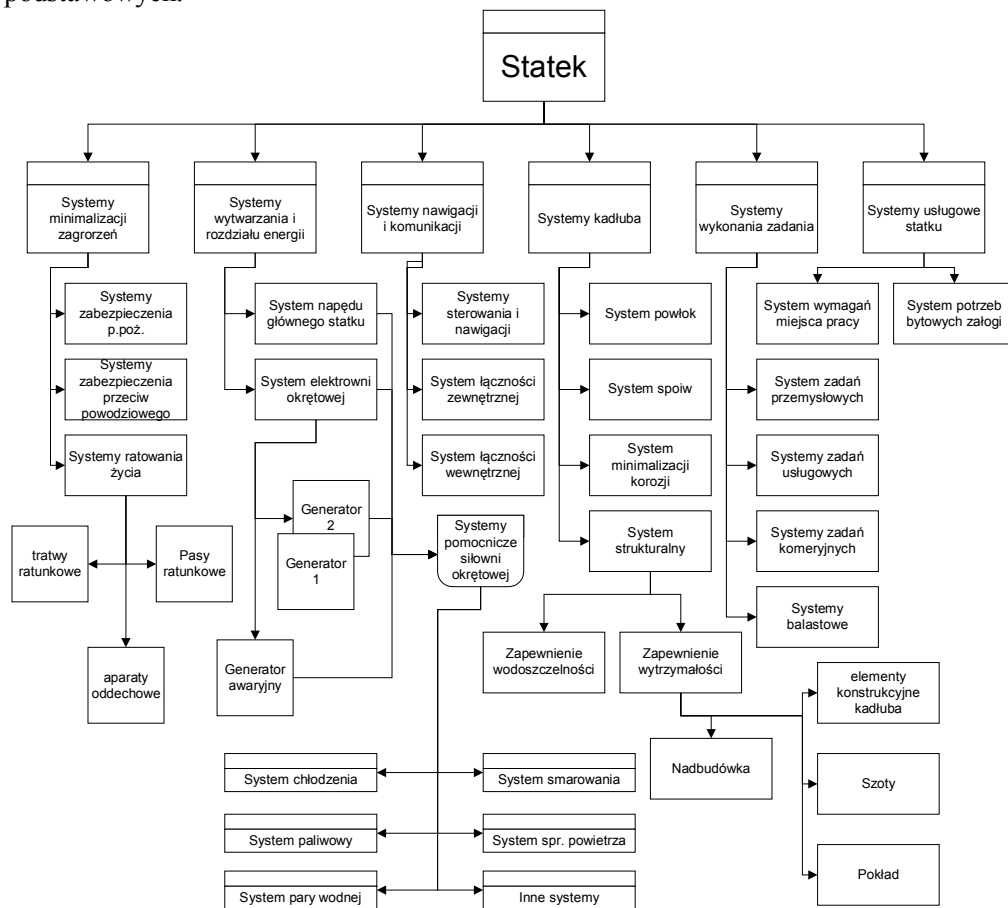
1. Wprowadzenie

Pośród wielu typów statków morskich wyróżnić można grupę statków wspierających operacje wydobywania ropy i gazu ziemnego. Statki te wyposażone są w systemy dynamicznego pozycjonowania *DP*, które służą automatycznemu utrzymaniu jednostki na określonej pozycji i azymucie. Dla zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa oraz niezawodności pracy większość podsystemów *DP* podlega rezerwowaniu. Dla zwiększenia efektywności pracy systemu dynamicznego pozycjonowania stosuje się bardzo często napęd typu spalinowo-elektrycznego [1]. Jednym z elementów systemu *DP* jest elektrownia okrętowa, od której zależy prawidłowe działanie całego systemu i co się z tym wiąże możliwość bezpiecznego i niezawodnego wykonania operacji technologicznych przez jednostkę pływającą. Lokalizację systemu energetycznego na tle statku jako całości pokazano na rys. 1.

System *DP* oraz jego podsystemy charakteryzują się wszystkimi rodzajami rezerwowania, wobec czego można sklasyfikować go jako system z rezerwą mieszaną. Dla przykładu zespoły prądowców elektrowni wykazują rezerwowanie rozdzielcze, natomiast siłownie rezerwowane są całościowo, i mamy do czynienia z rezerwowaniem

* Akademia Morska w Szczecinie, ul Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin

ogólnym. Ponadto zespoły prądotwórcze w pewnych stanach eksploatacyjnych pracują w układzie z większą ilością elementów podstawowych niż rezerwowych, przy czym każdy rezerwowy zespół prądotwórczy może zastąpić każdy z zespołów podstawowych (rezerwa przesuwająca się). Ze względu na obciążenia dominuje w systemach rezerwa gorąca (rezerwowanie pędników strumieniowych) lub ciepła (elektrownie) dla zapewnienia maksymalnego szybkiego przełączania w przypadku uszkodzenia elementów podstawowych.



Rys. 1. Dekompozycja morskiego obiektu pływającego [2]

Fig. 1. Offshore vessel decomposition [2]

W dalszej części przedstawiono wybrane modele opisujące strukturę systemu podsystemów DP odpowiedzialnych za wytwarzanie energii elektrycznej. Przedstawiono graficzne modele w formie drzew niezdatności oraz przykład zastosowania opracowanego przez autorów modelu wykorzystującego płaszczyznę liczb zespolonych do opisu rezerwowania w tych systemach.

2. Model rezerwowania wykorzystujący płaszczyznę zespoloną

Dla zamodelowania rezerwowania w systemie X wprowadzono przekształcenie $F(X, t)$. Wynikiem tego przekształcenia jest para liczb, które odpowiednio są równe ilości elementów podstawowych w systemie X w chwili t , oraz ilości elementów rezerwowych w systemie X w chwili t [6].

$$F(X, t) = \xi(\varphi(X, t)) = [P(X, t), R(X, t)] \quad (1)$$

gdzie:

$\varphi(X, t)$ – funkcja struktury systemu X w chwili t .

Elementy pary liczbowej zwracanej w wyniku powyższego przekształcenia w złożonych systemach technicznych są funkcją czasu.

Dla określonej chwili czasu $t \geq 0$ całkowita ilość elementów $\mathfrak{Z}(X, t)$ w systemie X jest równa:

$$\mathfrak{Z}(X, t) = P(X, t) + R(X, t) = \mathfrak{Z}(X, 0) - \mathfrak{Z}_{REST}(X, t) \quad (2)$$

gdzie:

$\mathfrak{Z}(X, 0)$ – liczebność systemu X przy założonej początkowej pełnej gotowości systemu w chwili $t=0$:

$$\mathfrak{Z}(X, 0) = \underset{t=0}{card}(X) = P(X, 0) + R(X, 0) \quad (3)$$

gdzie:

\mathfrak{Z}_{REST} – ilość elementów systemu X , które uległy uszkodzeniu do chwili t .

Funkcja $F(X, t)$ może być przedstawiona na płaszczyźnie zespolonej jako:

$$F(X, t) = P(X, t) + i R(X, t) \quad (4)$$

gdzie:

$$i = \sqrt{-1}$$

Współczynnik krotności rezerwowania definiowany jako stosunek ilości elementów rezerwowych do ilości elementów podstawowych opisany jest zależnością:

$$\kappa = \frac{R(X, t)}{P(X, t)} \quad (5)$$

Model może zostać zaadoptowany dla celów szacowania niezawodności systemu dynamicznego pozycjonowania oraz podsystemów związanych z wytwarzaniem energii elektrycznej dla potrzeb napędu, technologicznych oraz socjalnobytowych. Ponieważ dla poprawnego działania systemu dynamicznego pozycjonowania konieczne jest zapewnienie prawidłowej pracy jego wszystkich podsystemów struktura systemu DP odpowiada niezawodnościowej strukturze szeregowej złożonej z poszczególnych podsystemów. W oparciu o dekompozycję przedstawioną formułą (1) niezawodność $R(s, t)$ systemu dynamicznego pozycjonowania s w chwili t , może zostać przedstawiona jako:

$$R(s, t) = \prod_{k=1}^6 R(E_{S_k}, t) \quad (6)$$

gdzie:

$R(E_{S_k}, t)$ – niezawodność podsystemu E_{S_k} w chwili t , natomiast niezawodność poszczególnych podsystemów powiązanych z systemem wytwarzania energii elektrycznej może być przedstawiona w oparciu o zależności dla podstawowego systemu elektrowni okrętowej:

$$R(E_{S_2}, t) = \prod_{k=1}^5 R(E_{S_{2-k}}, t) \quad (7)$$

a dla systemu awaryjnego zasilania w energię elektryczną:

$$R(E_{S_4}, t) = \prod_{k=1}^4 R(E_{S_{4-k}}, t) \quad (8)$$

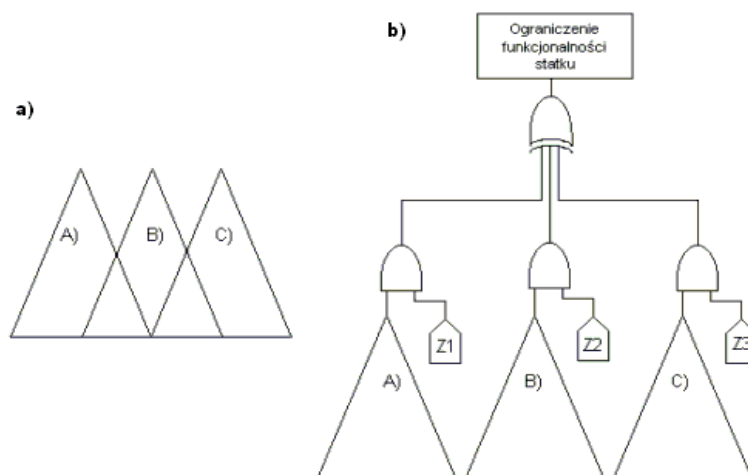
3. Modelowanie zmiany struktury funkcjonalnej

Istnieje wiele metod opisu systemów technicznych. Pośród stosowanych w odniesieniu do systemów okrętowych należy wymienić łańcuchy Markowa [7], schematy blokowe i struktury dekompozycji [8], grafy przejść stanów [9] i wiele innych [4]. Jednym ze sposobów pozwalających na wygodne transformowanie modeli pomiędzy różnymi formami, np. schematów blokowych niezawodności, zbiorów przekrojów minimalnych niezdatności, ścieżek minimalnych zdatności, modeli boolowskich itp. jest wykorzystanie metody analizy drzewa niezdatności *FTA*.

Dla zastosowań okrętowych modele systemów w formie drzew niezdatności pokazano m.in. w [2, 3, 5, 8]. Oprócz metody z jednym zdarzeniem szczytowym wyróżnia się tzw. *wielowierzchołkową* odmianę *FTA*, której zastosowanie w odniesieniu do systemu napędowego pokazano m.in. w [3]. Z uwagi na duże różnice pomiędzy konfiguracjami współpracujących elementów systemu energetycznego statku wspierającego eksplorację dna morskiego w poszczególnych stanach eksploatacyjnych jednostki konieczne jest zbudowanie kilku oddzielnych modeli jednowierzchołkowych. Każdy z takich modeli odpowiadałby określonemu stanowi eksploatacyjnemu np. postoju statku w porcie, podróży morskiej oraz operacji z systemem dynamicznego pozycjonowania. Alternatywą dla takiego sposobu modelowania może być drzewo wielowierzchołkowe, którego uproszczony widok pokazano na rys. 2a), gdzie A) B) oraz C) odpowiadają zajściu zdarzenia szczytowego dla określonego stanu eksploatacyjnego jednostki pływającej.

Wiele dostępnych na rynku programów do wspierania analizy systemów nie oferuje możliwości zamodelowania systemu w formie drzewa wielowierzchołkowego. Udostępniają one jednak dodatkowe typy zdarzeń jak np. zdarzenie zewnętrzne, dzięki któremu możliwe jest zamodelowanie na jednym drzewie niezdatności różnych stanów pracy

systemu. Zdarzenie zewnętrzne (ang. *house event*, *external event*) symbolizowane jest w metodzie *FTA* przez figurę w kształcie domku, reprezentuje



Rys. 2. Widok wielo- a) i jednowierzchołkowego b) drzewa niezdatności

Fig. 2. View of the a) single- b) multitop fault tree model

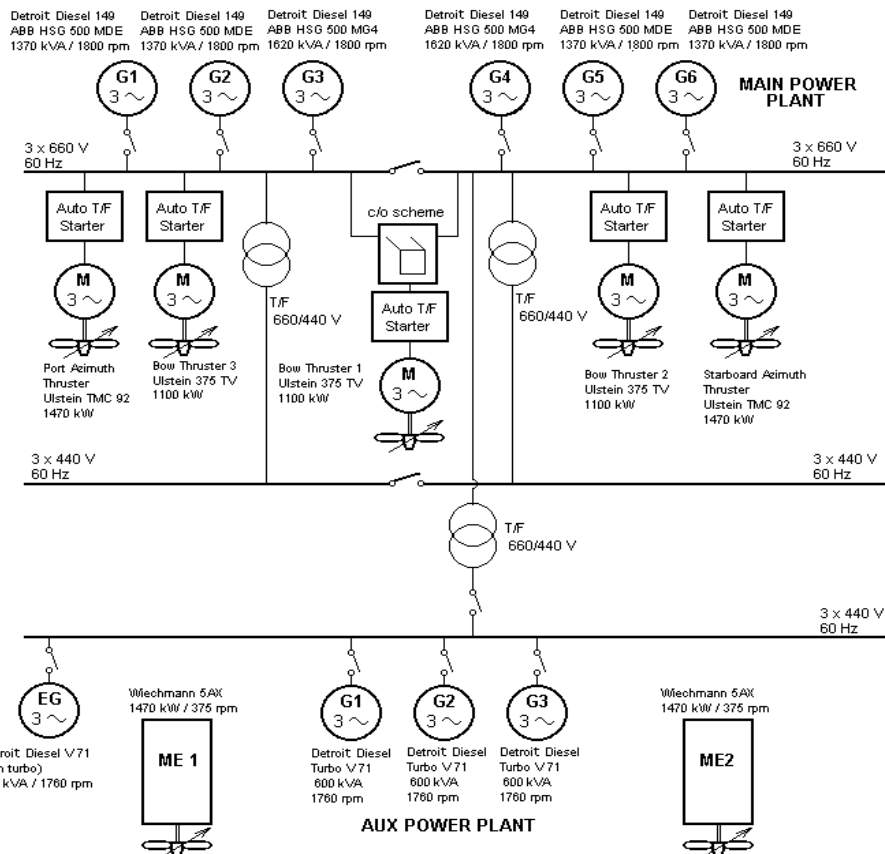
ono warunek lub zdarzenie, które jest albo prawdziwe $H = 1$ (ang. *true*, *ON*) albo fałszywe $H = 0$ (ang. *false*, *OFF*).

Najczęstszym zastosowaniem tego zdarzenia jest funkcja przełącznikowa w drzewie, do załączania i wyłączania części drzewa w zależności od stanu lub warunków pracy systemu, które podlegają analizie. Model pokazany na rys. 2a) można zastąpić wykorzystując zdarzenie zewnętrzne drzewem pokazanym na rys. 2b).

4. Przykład zastosowania metodyki

Zaprezentowane modele mogą być wykorzystane w analizie pracy elektrowni statku z napędem spalinowo-elektrycznym [5]. Statek wyposażony jest w system dynamicznego pozycjonowania (*DP System*) *Simrad ADP 703* z rezerwowym systemem *ADP 701*. Uproszczony schemat systemu energetyczno-napędowego przedstawiono na rys. 3. W analizie uwzględniono następujące elementy systemu: elektrownia główna (4 x *Detroit Diesel 149 – ABB HSG 500 MDE – 1370 kVA/1800 obr/min* oraz 2 x *Detroit Diesel 149 – ABB HSG 500 MG4 – 1620 kVA/1800 obr/min*), elektrownia pomocnicza (3 x *Detroit Diesel V71 Turbo – 600 kVA/1760 obr/min*), napęd główny spalinowy (2 x *Wiechmann 5AX – 1470 kW/375 obr/min*), napęd pomocniczy elektryczny (2 x *Ulstein TMC92 – 1470 kW*) oraz dziobowe sterzy strumieniowe (3 x *Ulstein 375 TV – 1100*

kW).

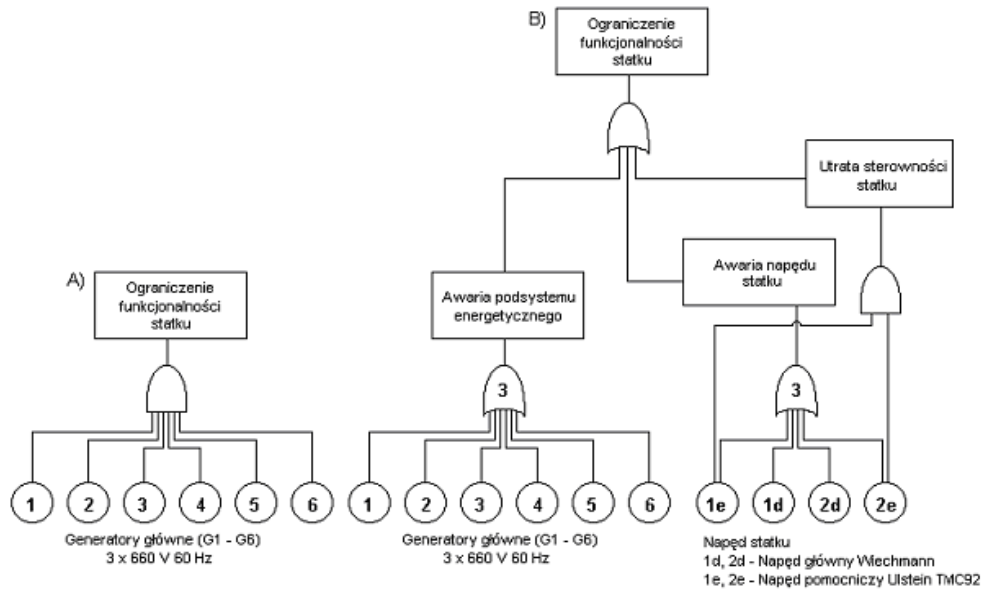


Rys. 3. Schemat systemu energetyczno-napędowego wielozadaniowego statku oceanotechnicznego
 Fig. 3. Power plant system of multi support offshore vessel diagram

System podlegał obserwacji podczas pracy siłowni w różnych stanach eksploatacyjnych związanych z pełnieniem przez statek różnych funkcji: praca podczas postoju w porcie, podróży morskiej oraz pracy systemu *DP*. Inne stany np. praca w warunkach awaryjnych nie zostały uwzględnione. W warunkach normalnej eksploatacji zgodnie z procedurami operacyjnymi modele rezerwowania wykorzystujące płaszczyznę zespoloną są następujące: dla stanu postoju statku w porcie $F(X,t) = [P(E_{S2}, t=0), R(E_{S2}, t=0)]=(1,6)$; dla stanu podróży morskiej statku $F(X,t) = [P(E_{S2}, t=0), R(E_{S2}, t=0)]=(4,2)$; dla stanu pracy statku z systemem *DP* $F(X,t) = [P(E_{S2}, t=0), R(E_{S2}, t=0)]=(4,2)$.

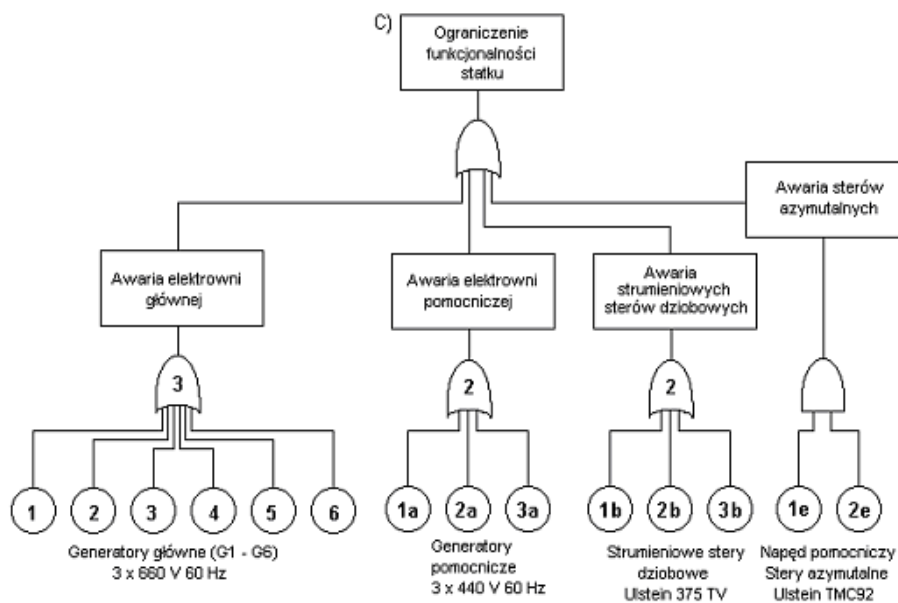
Odpowiednie poddrzewa niezdatności dla tych stanów A) postój w porcie, B) podróż morska i C) praca z systemem *DP* stosownie do modeli pokazanych na rys. 2 przedstawiono na rys. 4 i 5. Zaistnienie zdarzenia szczytowego ($ZS=1$) określonego tu jako

Ograniczenie funkcjonalności statku dla poszczególnych stanów pracy można przedstawić w formie algebry Boole'a, co zaprezentowano w [5].



Rys. 4. Drzewa niezdatności systemu energetyczno-napędowego dla stanów pracy A) i B)

Fig. 4. Fault tree models for power plant system for A) and B) operating states



Rys. 5. Drzewa niezdatności systemu energetyczno napędowego statku dla stanu pracy C)

Fig. 5. Fault tree models for power plant system of offshore vessel for C) operating state

5. Uwagi końcowe

Wybrane modele systemów energetycznych statków z głównym napędem spalinowo-elektrycznym przedstawione w pracy mogą znaleźć zastosowanie w analizie złożonych systemów wielostanowych. Statki oceanotechniczne charakteryzują się specyficznymi stanami eksploatacyjnymi związanymi z wykonywaniem przez nie zadań technologicznych [1]. Poszczególne stany charakteryzują się inną konfiguracją współpracujących elementów systemu, jaki stanowi cały statek jak też jego podsystemów. Elektrownia jednostki oceanotechnicznej stanowi system o zmiennej w czasie strukturze funkcjonalnej i niezawodnościowej, co wynika ze zmiany struktury funkcjonalnej w związku ze zmianą stanu eksploatacyjnego (warunkuje to inna wymagana do pracy minimalną ilość elementów podstawowych) ponadto mniejsza liczba wymaganych elementów podstawowych zwiększa automatycznie liczebność elementów rezerwowych, a elementy systemu mogą w czasie eksploatacji systemu technicznego przechodzić w stan niezdatności, co powoduje zmniejszenie się ilości pozostałych, gotowych do pracy elementów.

Dla przedstawionej specyfikacji pracy systemu wytwarzania energii elektrycznej na statkach wspierających eksplorację dna morskiego wygodne jest zastosowanie proponowanego przez autorów modelu rezerwowania elementów z wykorzystaniem płaszczyzny zespolonej. Poszczególne zmiany stanów jak również porównanie stanów eksploatacyjnych w różnych chwilach czasowych lub dwóch różnych statków jest możliwe poprzez analizę na płaszczyźnie zespolonej trajektorii punktów (uszkodzenia i odnowy elementów) odpowiadających elementom systemu energetycznego.

Literatura

- [1] Ådnanes A. K., *Maritime Electrical Installations And Diesel Electric Propulsion*. ABB, Oslo 2003.
- [2] Ayyub B. M., *Guidelines for Probabilistic Risk Analysis of Marine Systems*. CBST-97-101. University of Maryland, College Park, May 1997.
- [3] Brandowski A., Literacki R., Nowak P., *Badania bezpieczeństwa napędowego statku serii B-488*. Praca badawcza nr 48/2000/PB. WOiO, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2000.
- [4] Cempel Cz., *Teoria i inżynieria systemów - zasady i zastosowania myślenia systemowego*. Politechnika Poznańska 29.04.2004. (<http://neur.am.put.poznan.pl/systemy/systemy.htm>)
- [5] Chybowski L., *Analiza pracy systemu energetyczno-napędowego statku typu offshore z wykorzystaniem metody drzew uszkodzeń*. XXII SymSO 2001. WTM PS, Szczecin 2001, s. 83-88.
- [6] Chybowski L., Niecewicz G., *Rezerwowanie w systemach dynamicznego pozycjonowania statków wspierających eksplorację dna morskiego*. Zastosowania Teorii Systemów. WIMiR AGH Kraków 2005, s. 61-71.
- [7] Girtler J., Kitowski Z., Kuriata A., *Bezpieczeństwo okrętu na morzu – ujęcie systemowe*. WKiŁ Warszawa 1995.
- [8] Hann M., Siemionow J. N., Rosochacki W., *Wybrane zagadnienia bezpieczeństwa i niezawodności obiektów górnictwa morskiego*. IOiO, Politechnika Szczecińska, Szczecin 1998.

[9] Matuszak Z., *Wybrane zagadnienia bezpieczeństwa siłowni okrętowej*. Studia WSM nr 25. Szczecin 1996.