

STRUKTURY NIEZAWODNOŚCIOWE SYSTEMÓW NAPĘDOWYCH STATKÓW Z UWZGLĘDNIENIEM FUNKCJI OPERATORSKICH

W artykule przedstawiono sposób wyznaczania struktur niezawodnościowych systemu napędowego statku z uwzględnieniem funkcji realizowanych przez operatora. Zaprezentowano przykład wykorzystania metody HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique) do analizy niezawodności człowieka. Wyznaczono antropotechniczną strukturę niezawodności na przykładzie instalacji zasilania paliwa, będącej częścią systemu napędowego statku kontenerowego wyposażonego w silnik wolnoobrotowy ze śrubą o stałym skoku. Zdefiniowano główne funkcje operatorskie występujące w rozpatrywanym systemie i przeprowadzono przykładową analizę niezawodności człowieka z wykorzystaniem techniki HEART, uwzględniając wybrane czynniki wpływające niekorzystnie na działania operatora. Przedstawiono wyniki predykcji niezawodności instalacji zasilania paliwa z uwzględnieniem braku dostępnego czasu na wykonanie funkcji operatorskich jako przykładowego warunku negatywnie wpływającego na działania realizowane przez operatora. Do analizy wykorzystano dane niezawodnościowe urządzeń technicznych uzyskane z badań eksperckich (A. Brandowski, W. Frąckowiak i inni) w latach 2007–2009.

WSTĘP

Analizując systemy pod względem niezawodności, często traktuje się je jako obiekty jedynie techniczne, pomijając oddziaływanie człowieka. Jednakże jest on elementem tego systemu mającym szczególne właściwości, jest zawodny, a funkcje, jakie pełni operator, mają duże znaczenie i w istotny sposób wpływają na niezawodność całego systemu. Pominięcie operatora w tych analizach spowodowane jest często brakiem potrzebnych danych oraz złożonością i wieloczynnikowością metod oszacowania niezawodności człowieka.

W artykule przedstawiono sposób wyznaczania struktur niezawodnościowych z uwzględnieniem funkcji operatorskich na przykładzie wybranej instalacji systemu napędowego statku. System napędowy statku morskiego (SN) zdefiniujemy jako zespół urządzeń powiązanych ze sobą funkcjonalnie, koniecznych do wytwarzania siły naporu określonej co do wartości i kierunku [6]. Do ich składu, w zależności od typu napędu, będziemy zaliczać silnik lub silniki napędowe, przeniesienie napędu i pędniki, czyli układ napędowy (UN), oraz instalacje pomocnicze (IP) konieczne do zapewnienia pracy układu napędowego (instalacja zasilania paliwa, smarowania, chłodzenia, sprężonego powietrza oraz inne). SN należy traktować jako obiekt antropotechniczny, gdyż utrata bądź obniżenie zdolności do realizacji

przypisanej mu funkcji, czyli wytwarzania napędu, może nastąpić na skutek uszkodzeń elementów technicznych lub błędów popełnionych przez załogę w procesie jego użytkowania.

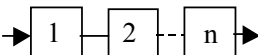
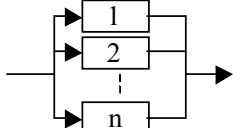
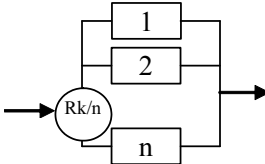
1. STRUKTURY NIEZAWODNOŚCIOWE

Na niezawodność SN ma wpływ wiele czynników, głównie niezawodność elementów podstawowych wchodzących w jego skład, niezawodność operatorów oraz jego struktura niezawodnościowa. Struktury niezawodnościowe są to schematy przedstawiające, w jaki sposób niezdatności elementów obiektu, reprezentowane przez bloki lub ich kombinacje, wywołują niezdatność całego obiektu [9]. Otrzymuje się je ze struktury ogólnej poprzez dekompozycje systemu oraz wydzielenie zbioru elementów podstawowych, a także rezerwowych. Następnie przedstawia się go w formie struktury hierarchicznej. Na szczycie struktury znajduje się system naczelny, w naszym przypadku SN statku, który powinien zostać zdekomponowany na podsystemy, w kolejnych zaś poziomach na zespoły urządzeń, urządzenia, elementy urządzeń itd. System dekomponuje się do poziomu, w którym dysponuje się danymi niezawodnościowymi. Liczba poziomów dekompozycji zależy od złożoności badanego obiektu oraz od dysponowanych danych niezawodnościowych.

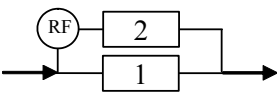
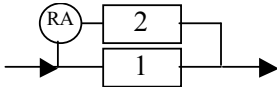
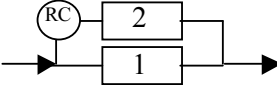
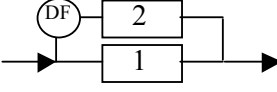
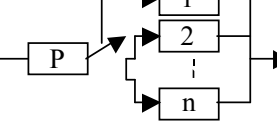
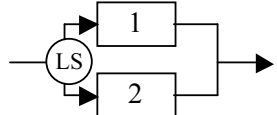
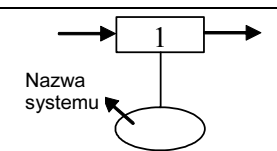
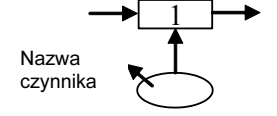
Uzyskana w ten sposób struktura najczęściej przyjmuje formę złożoną. Do oszacowania niezawodności konieczne jest wydzielenie ze struktury złożonej modułów podstawowych. Na potrzeby dalszych analiz w tabeli 1 przedstawiono przykładowe moduły niezawodnościowe oraz relacje występujące pomiędzy elementami systemu [3, 8].

Tabela 1. Przykłady podstawowych podstruktur niezawodnościowych [3, 8]

Table 1. Examples of basic reliability substructures [3, 8]

Nazwa	Struktura	Opis
Szeregowa struktura niezawodnościowa		Uszkodzenie któregośkolwiek z n elementów skutkuje uszkodzeniem całego systemu
Równoległa struktura niezawodnościowa		Uszkodzenie wszystkich n elementów powoduje uszkodzenie systemu
Rezerwa „ k z n ” (Rk/n)		Utrata funkcji przez system następuje po uszkodzeniu k elementów z ogólnej ich liczby n

cd. tab. 1

Nazwa	Struktura	Opis
Rezerwa funkcjonalna (RF)		Po uszkodzeniu urządzenia podstawowego funkcja może być realizowana przez element mający inne zastosowanie lub element innego systemu
Rezerwa awaryjna (RA)		W przypadku uszkodzenia systemu jest włączany system awaryjny realizujący funkcję w okrojonym zakresie
Rezerwa czasowa (RC)		System w rezerwie czasowej może być użytkowany krótko w stosunku do czasu pracy systemu podstawowego i daje możliwość jego naprawy
Degradacja funkcji (DF)		Uszkodzenie elementu nie powoduje utraty funkcji przez system, a jedynie degradację poziomu jej realizacji
Struktura niezawodnościowa z rezerwą wyczekującą (standby redundant system)		Pracuje jedno z urządzeń systemu. W momencie uszkodzenia elementu pracującego przelutownik „P” uruchamia kolejny element będący w stanie wyczekującym
Równoległe struktury niezawodnościowe z podzielonym obciążeniem (LS – load sharing system)		Uszkodzenie jednego elementu systemu powoduje przejście jego obciążenia przez pozostałe, zdadne elementy, które pracują od tego czasu bardziej obciążone, co zwiększa intensywność ich uszkodzeń
Powiązanie strukturalno-konstrukcyjne elementów		Połączenie między elementami systemu lub systemów natury konstrukcyjnej
Zasilanie energetyczno-materiałowo-informacyjne		Połączenia zasileniowe z innymi podsystemami, np. zasilanie energią elektryczną z sieci

2. ANALIZY NIEZAWODNOŚCI OPERATORA

Do wyznaczenia niezawodności operatora służą analizy niezawodności człowieka (*Human Reliability Analysis – HRA*). Jest wiele metod HRA. Szeroko akceptowaną jest metoda THERP (*Technique for Human Error Rate Prediction*)

zaproponowana przez Swaina i Guttmanna w 1983 roku. Cechuje ją dobra dokładność oraz szczegółowość, jednakże jest skomplikowana i ma duże wymagania co do zasobów [1]. W związku z powyższym w niniejszej analizie do oszacowania niezawodności operatora wykorzystano metodę HEART (*Human Error Assessment and Reduction Technique*) opracowaną przez Wiliamsa w 1985 roku, a następnie zmodyfikowaną w 1988 roku. Cechuje ją szybkość i łatwość analizy oraz małe wymagania co do zasobów danych. Uwzględnia się w niej zadania człowieka oraz czynniki ergonomiczne i środowiskowe, które wpływają negatywnie na wykonywanie tych zadań. Twórcy HEART opracowali ogólne zadania i odpowiadające im wartości nominalne zawodności człowieka oraz zestawienie warunków wpływających niekorzystnie na działanie człowieka wraz ze współczynnikami korekcyjnymi. Przykładowe wielkości tych parametrów zamieszczono w tabelach 2 oraz 3.

Tabela 2. Zestawienie ogólnych zadań i wartości nominalnych zawodności człowieka [1, 10]

Table 2. General tasks and the nominal values of human unreliability [1, 10]

Ogólne zadania	Proponowane wartości zawodności człowieka
(A) Zupełnie nieznanne, wykonywane pośpiesznie, bez świadomości możliwych skutków	0,55
(B) Przywrócenie lub spowodowanie nowego stanu systemu bez nadzoru lub procedur	0,26
(C) Złożone zadanie wymagające wysokiego poziomu rozumowania i zręczności	0,16
(D) Prostsze zadania wykonywane szybko lub z niewystarczającą uwagą	0,09
(E) Rutynowe, dobrze wypracowane, szybkie zadania wymagające stosunkowo niskiego poziomu zręczności	0,02
(F) Przywrócenie lub spowodowanie nowego stanu systemu według procedur	0,003
(G) Rutynowe, dobrze wypracowane zadania przez dobrze wyszkoloną osobę	0,0004
(H) Odpowiedź na sygnał w sytuacji nadzorującego zautomatyzowanego systemu podającego dokładną interpretację stanu systemu	0,00002
(M) Różne zadania bez znajomości ich opisu	0,03

W metodzie tej należy określić ważność ww. warunków wpływających negatywnie na działanie człowieka i wyznaczyć czynniki, które potencjalnie wpływają na działanie człowieka. Prawdopodobieństwo błędu człowieka zależy od iloczynu współczynników związanych z tymi czynnikami.

Tabela 3. Przykładowe warunki wpływające niekorzystnie na działanie człowieka wraz z wartościami współczynników korekcyjnych [1, 10]

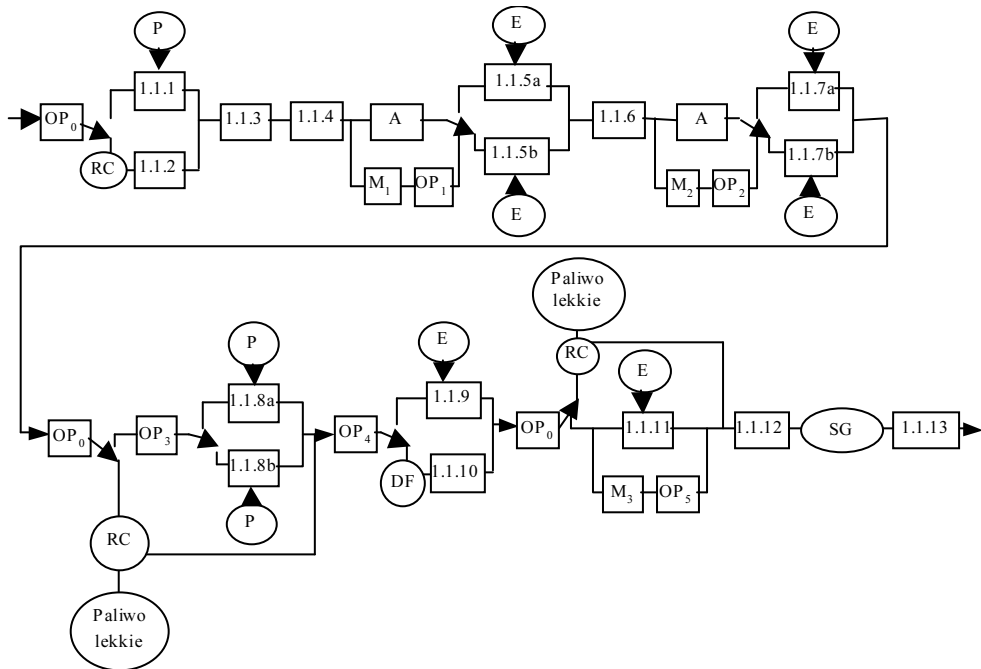
Table 3. Examples of conditions adversely affect the human activity with the values of correction factors [1, 10]

Warunki	Współczynnik korekcyjny
Brak czasu dostępnego na wykrycie błędu i jego korekcję	x 11
Niezgodność modelu rzeczywistości operatora z modelem wyobrażanym przez projektanta	x 8
Dwuznaczność w wymaganych sposobach działania	x 5
Brak doświadczenia operatora	x 3
Warunki do wybrania niewłaściwej procedury	x 2
Wysoki poziom emocjonalnego stresu	x 1,3
Wiek personelu wykonującego zadania percepcyjne	x 1,02

3. PRZYKŁAD

Do egzemplifikacji posłużono się instalacją zasilania paliwa statku kontenerowego napędzanego silnikiem wolnoobrotowym ze śrubą o stałym skoku. Struktura niezawodnościowa została wyznaczona na podstawie schematu funkcjonalnego rzeczywistej instalacji tego typu statku, zdekomponowanej do IV poziomu, czyli poziomu urządzeń. Poniżej przedstawiono strukturę takiego podsystemu z uwzględnieniem funkcji i niezawodności operatora. W analizie uwzględniono wpływ człowieka na niezawodność elementów tylko w czasie użytkowania, nie wzięto pod uwagę wpływu człowieka podczas odnów urządzeń.

Instalacja zasilania paliwa ma za zadanie przygotować oraz dostarczyć paliwo ciężkie lub lekkie, o odpowiednich parametrach, ze zbiorników rozchodowych do silnika głównego SG. Paliwo lekkie używane jest jedynie w sytuacji uszkodzenia elementów instalacji koniecznych do przygotowania paliwa ciężkiego lub w celu przepłukania instalacji przed odstawieniem SG na dłuższy czas. Ze względu na niewielką ilość paliwa lekkiego praca SG na paliwie lekkim jest ograniczona czasowo. Z tego powodu oznaczono ją na schemacie niezawodnościowym (rys. 1) jako rezerwę czasową (RC). W celu zapewnienia większej niezawodności instalacji niektóre elementy są zdublowane i pracują w układzie równoległym lub z rezerwą wyczekującą.



Rys. 1. Struktura niezawodnościowa instalacji zasilania paliwa

Fig. 1. Reliability structure of fuel supply systems

Instalacja ta tworzy złożoną strukturę niezawodnościową zbudowaną z modułów podstawowych (rys. 1), gdzie:

- 1.1.1 – zbiornik paliwa ciężkiego z zaworami umieszczonymi na zbiorniku, układem pary grzewczej,
- 1.1.2 – zbiornik paliwa lekkiego włącznie z zaworami umieszczonymi na zbiorniku,
- 1.1.3 – automatyczny zawór trójdrożny,
- 1.1.4 – rurociągi paliwa ze zbiorników do pomp zasilających wraz z układem pary grzewczej i wyposażeniem (zawory, czujniki temperatury i ciśnienia paliwa),
- 1.1.5ab – pompy zasilające (od zaworów ssawnych do tłocznych włącznie) wraz z silnikami elektrycznymi,
- 1.1.6 – rurociągi paliwa niskiego ciśnienia wraz z układem pary grzewczej i wyposażeniem (zawory, czujniki temperatury i ciśnienia paliwa),
- 1.1.7ab – pompy cyrkulacyjne (od zaworów ssawnych do tłocznych włącznie) wraz z silnikami elektrycznymi,
- 1.1.8ab – ogrzewacze paliwa z zaworami odcinającymi i układem pary grzewczej,
- 1.1.9 – automatyczny filtr paliwa dokładnego oczyszczenia,
- 1.1.10 – rezerwowy filtr paliwa dokładnego oczyszczenia,
- 1.1.11 – układ regulacji lepkości paliwa,

1.1.12 – rurociągi paliwa do silnika wraz z układem pary grzewczej i wyposażeniem (zawory, czujniki temperatury i ciśnienia paliwa),

1.1.13 – rurociągi powrotne paliwa wraz z układem pary grzewczej i wyposażeniem (zawory, czujniki temperatury i ciśnienia paliwa),

RC – rezerwa czasowa,

DF – degradacja funkcji,

A – automatyczny start urządzenia wyczekującego,

M – manualne sterowanie,

OP – operator,

E – doprowadzenie energii elektrycznej,

P – doprowadzenie pary,

SG – silnik główny.

W strukturze wyszczególniono również bloki reprezentujące niezawodność operatora (OP) pełniące przypisane mu funkcje:

- OP0 – przesterowanie układu na zasilanie paliwem lekkim,
- OP1 – uruchomienie rezerwowej pompy zasilającej paliwa w sytuacji, gdy uszkodzi się pompa będąca w stanie użytkowania aktywnego i nie zadziała układ automatycznego startu urządzenia rezerwowego (A),
- OP2 – uruchomienie rezerwowej pompy cyrkulacyjnej paliwa w sytuacji, gdy uszkodzi się pompa będąca w stanie użytkowania aktywnego i nie zadziała układ automatycznego startu urządzenia rezerwowego (A),
- OP3 – przesterowanie zaworów paliwowych i parowych w celu uruchomienia podgrzewacza rezerwowego w sytuacji uszkodzenia podgrzewacza będącego w stanie użytkowania aktywnego,
- OP4 – przesterowanie zaworów paliwowych w celu uruchomienia rezerwowego filtra paliwa w sytuacji uszkodzenia automatycznego filtra paliwa,
- OP5 – manualne sterowanie lepkością paliwa ciężkiego.

Poniżej przedstawiono przykładową analizę niezawodności operatora metodą HEART, realizującego funkcję „OP1”. Należy oszacować prawdopodobieństwo niepowodzenia uruchomienia przez operatora rezerwowej pompy zasilającej paliwa w sytuacji, gdy uszkodzi się pompa będąca w stanie użytkowania aktywnego i nie zadziała układ automatycznego startu urządzenia rezerwowego. To rutynowe, dobrze wypracowane, szybkie zadanie wymagające stosunkowo niskiego poziomu zręczności, ale sytuacja jest awaryjna, więc cechuje ją wysoki poziom emocjonalnego stresu. Założono również, że operator jest nowym niedoświadczonym członkiem załogi. Ze względu na to, że jest to pompa zasilająca paliwo, operator ma na wykonanie zadania stosunkowo dużo czasu. Stosując podejście HEART, wybiera się typ zadania (tab. 2), któremu odpowiada określona wartość zawodności. W tym przypadku jest to typ zadania (E) i odpowiadająca mu zawodność człowieka (0,02). Uwzględnia się następnie warunki sprzyjające popełnieniu błędu ze współczynnikami korekcyjnymi (tab. 3), którymi będą: wysoki poziom emocjonalnego stresu ($\times 1,3$) oraz brak doświadczenia operatora ($\times 3$). Kolejnym krokiem jest określenie względnej ważności warunków dla tego zadania (poprzez przyjęcie wartości od 0 do 1) i ocenienie wartości współczynników korygujących zawodność nominalną człowieka (tab. 4).

Tabela 4. Przykłady współczynników wpływu oddziaływających na wartość nominalną zawodności człowieka wykonującego funkcję „OP1”**Table 4.** Examples of impact factors affecting nominal unreliability value of human performing function “OP1”

Czynnik	Współczynnik korekcyjny	Względna ważność	Wartość współczynników wpływu
Brak doświadczenia	× 3	0,9	$(3 - 1) \times 0,9 + 1 = 2,8$
Wysoki poziom emocjonalnego stresu	× 1,3	0,4	$(1,3 - 1) \times 0,4 + 1 = 1,12$

Prawdopodobieństwo niezawodności operatora realizującego funkcję OP1 dla ww. warunków będzie równe:

$$Q_{OP1} = 1 - (0,02 \times 2,8 \times 1,12) = 0,9373. \quad (1)$$

Jak widać, metoda ta jest stosunkowo prosta i nadaje się do szybkiej analizy niezawodności człowieka, daje możliwość powiązania ważniejszych czynników ergonomicznych związanych z projektowanym systemem z probabilistycznymi oszacowaniami błędów człowieka. Niestety ma również wady. Brak uwzględnienia zależności pomiędzy kolejnymi zadaniami może powodować problemy w ocenie błędów człowieka. Dane zawarte w tabeli 2 i 3 zostały opracowane przez twórców metody i jest do tej pory niedostatecznie wyjaśniona kwestia dotycząca źródeł ich wartości (nominalne prawdopodobieństwa błędów i współczynniki korygujące) [1].

Tabela 5 zawiera wartości intensywności uszkodzeń urządzeń instalacji zasilania paliwa uzyskane w wyniku badań eksperckich w latach 2007–2009 [4, 5, 6]. Do wyznaczenia niezawodności instalacji wykorzystano dostępne w literaturze przedmiotu wzory dla podstawowych struktur niezawodnościowych [8], zakładając wykładniczy rozkład czasu do uszkodzenia elementów technicznych systemu.

Tabela 5. Intensywności uszkodzeń (λ_a) urządzeń instalacji zasilania paliwa [4, 5, 6]**Table 5.** ICF type failure rates (λ_a) of the fuel supply system devices [4, 5, 6]

Nr	Urządzenie	λ_a [1/h]
1	Zbiornik rozchodowy paliwa	1,77994E-06
2	Pompa zasilająca	1,26376E-05
3	Pompa cyrkulacyjna	1,26376E-05
4	Podgrzewacz paliwa	5,16183E-06
5	Filtr paliwa	1,31716E-05
6	Układ regulacji lepkości paliwa	1,54855E-05
7	Rurociągi paliwowe	1,05313E-06

W tabeli 6 przedstawiono uzyskane wyniki niezawodności instalacji zasilania paliwa badanego SN z uwzględnieniem funkcji realizowanych przez operatora oraz przy założeniu braku dostępnego czasu na wykonanie powierzonego mu zadania [7]. Estymację przeprowadzono dla różnych czasów predykcji (od 6 do 36 miesięcy).

Tabela 6. Niezawodności instalacji zasilania paliwa przy założeniu braku dostępnego czasu na wykonanie zadania [7]

Table 5. Results of fuel supply system reliability prediction assuming lack of available time to perform the tasks [7]

Czas estymacji niezawodności [miesiące]	Niezawodność instalacji zasilania paliwa przy założeniu braku dostępnego czasu na wykonanie zadania
6	0,958
12	0,909
18	0,856
24	0,801
30	0,745
36	0,688

PODSUMOWANIE

System napędowy statku należy traktować jako obiekt składający się z elementów technicznych i antropijnych. Dokładne metody analiz niezawodności człowieka (THERP) są pracochłonne, skomplikowane, wymagają dużych zasobów danych. Te mniej skomplikowane (HEART) mają wiele uproszczeń i nie uwzględniają wszystkich zależności. Budując struktury niezawodnościowe SN statku, nie jesteśmy w stanie uwzględnić wszystkich czynników mających wpływ na tak złożony obiekt. Dekompozycja SN jest przeprowadzana tylko do pewnego poziomu ze względu na pracochłonność i brak danych dotyczących szczegółów. Obiektywne dane niezawodnościowe, uzyskane w rzeczywistości, są trudno dostępne. Istniejące komercyjne bazy danych są bardzo drogie i nie zawsze nadają się do wykorzystania w analizie.

W związku z powyższym oszacowanie niezawodności SN jest bardzo skomplikowane, czasochłonne i obarczone dużą niepewnością. Słuszne wydaje się poszukiwanie alternatywnych, prostszych metod modelowania niezawodności SN, które będą uwzględniać wpływ człowieka i umożliwiać wykorzystywanie informacji subiektywnych, czyli uzyskanych z badań eksperckich.

LITERATURA

1. Borysiewicz M., *Wykorzystanie probabilistycznych analiz bezpieczeństwa (PSA) w tworzeniu wymogów bezpieczeństwa dla elektrowni jądrowych*, Warszawa 2010.
2. Brandowski A., *Metodyka projektowania bezpieczeństwa systemów okrętowych*, Prace Instytutu Nauk Podstawowych Technicznych Wyższej Szkoły Morskiej, Gdańsk 1990.
3. Brandowski A., *Procedura analizy wpływu uszkodzeń na bezpieczeństwo systemu napędowego*, Prace Instytutu Nauk Podstawowych Technicznych Wyższej Szkoły Morskiej, Gdańsk 1989.

4. Brandowski A., Frąckowiak W., Mielewczyk A., *Subjective reliability estimation of the seagoing ship systems*, Safety, Reliability and Risk Analysis, Stavanger 2007.
5. Brandowski A., Frąckowiak W., Nguyen H., Podsiadło A., *Risk estimation of the sea-going ship casualty as the consequences of propulsion loss*, Safety, Reliability and Risk Analysis, Prague 2009.
6. Brandowski A., Frąckowiak W., Nguyen H., Podsiadło A., *Subjective propulsion risk of a seagoing ship estimation*, Safety, Reliability and Risk Analysis, Valencia 2008.
7. Frąckowiak W., *Influence of environmental, ergonomic factors and properties of operators on the reliability of ships propulsion systems*, Journal of KONES Powertrain and Transport, 2012, vol. 19, no. 2.
8. Modarres M., Kaminskiy M., Krivtsov V., *Reliability Engineering and Risk Analysis*, Rochester, New York 1999.
9. PN-93 N-50191 *Słownik terminologiczny elektryki. Niezawodność, jakość usługi*.
10. Williams J.C., *HEART – A proposed method for achieving high reliability in process operation by means of human factors engineering technology in Proceedings of a Symposium on the Achievement of Reliability in Operating Plant*, Safety and Reliability Society, Birmingham 1985.

RELIABILITY STRUCTURES OF SHIPS PROPULSION SYSTEMS INCLUDING OPERATOR FUNCTIONS

Summary

The paper presents the way of determining the ship propulsion systems reliability structures including the functions performed by the operator. Example of using the „HEART” method (Human Error Assessment and Reduction Technique) for human reliability analysis has been presented. The anthropotechnical reliability structure of fuel supply system, as a part of container ship propulsion system equipped with low-speed piston engine and fixed pitch propeller, has been determined as an example. The main functions of the operator, occurring in the considered system, were defined and example of human reliability analysis using „HEART” techniques was carried out taking into account selected factors, that adversely affect the operator's actions. The results of the fuel supply system reliability prediction, considering the lack of available time to perform the tasks, as an example of the conditions adversely affecting the functions carried out by the operator were presented. The study is based on reliability data of technical objects derived from the research (Brandowski A., Frąckowiak W. et al.) in the years 2007–2009.