

JAKOŚCIOWO-ILOŚCIOWA ANALIZA WAŻNOŚCI ELEMENTÓW W STRUKTURZE NIEZAWODNOŚCIOWEJ SYSTEMÓW

LESZEK CHYBOWSKI

Streszczenie

W artykule przedstawiono koncepcję projektu badawczego mającego na celu opracowanie nowej metodyki służącej ocenie ważności elementów w strukturze niezawodnościowej złożonych systemów technicznych. Przedstawiono cele i plan badań, a także przewidywane rezultaty będące wynikiem projektu.

Słowa kluczowe: miara ważności, struktura niezawodnościowa, złożony system techniczny

1. Wprowadzenie

Dla oceny wpływu uszkodzeń elementów systemu na jego niezawodność wprowadzono niezawodnościowe miary ważności. Pomimo zaawansowanego matematycznego (teoretycznego) aparatu oceny ważności, zastosowanie znanych miar ważności często jest ograniczone lub niemożliwe z uwagi na brak pełnych informacji o relacjach w systemie i uszkodzalności jego elementów, co czyni znane miary ważności nieprzydatnymi w odniesieniu do złożonych systemów technicznych (CTS) [11], [15].

CTS, w tym siłownie okrętowe są systemami trudnymi w opisie [8], [9], [10], [13] jako, że są obiektami:

- odnawialnymi lub częściowo-odnawialnymi,
- o zmiennej w czasie strukturze funkcjonalnej i niezawodnościowej,
- złożonymi o hierarchicznej strukturze i wielopoziomowych często nie znanych sprzężeniach zwrotnych,
- o uszkodzeniach elementów częściowo lub całkowicie zależnych,
- dla, których znamy odpowiedzi jedynie na określony zakres i charakter wymuszeń i zakłóceń,
- z nieznanymi związkami nadmiarowości, które stanowią zbiory pokrywające się [14],
- których struktura niezawodnościowa pomimo znanych wydzielonych podstawowych elementów funkcjonalnych często nie jest znana w całości lub w znacznej części.

W związku z ograniczoną stosowalnością lub brakiem zastosowania wielu miar ważności elementów w CTS nasuwa się konieczność opracowania nowoczesnej metodyki pozwalającej na określenie rankingów ważności elementów i grup elementów w CTS dla zadanych kryteriów ważności [1], [2], [3], [4], [5], [6], [11], [12], [13], [15], [16], [17], [18], co jest celem realizacji przez autora projektu badawczego.

Opracowana metodyka rozwinięciem nauki oraz znajdzie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, co wpłynie na rozwój cywilizacji i społeczeństwa korzystającego w wielu aspektach codziennego życia ze złożonych obiektów eksploatacji.

Jednym ze sposobów pozyskania wiedzy o systemie jest wykorzystanie metod eksperckich, w tym aplikacji prawdopodobieństwa subiektywnego. Dotychczasowe prace naukowe przedstawiające wykorzystanie analizy ważności jako przedmiot analizy wykorzystuje proste teoretyczne systemy o niezależnych zdarzeniach i wprowadzonych elementarnych interakcjach z otoczeniem. Wobec ewidentnej „niszy” w wymienionym obszarze wiedzy zamierzeniem autora jest stworzenie całościowej metodyki ilościowo-jakościowej, która pozwoli na znacznie efektywniejszą w porównaniu wcześniej stosowanych metod, analizę ważności CTS, co będzie stanowiło istotny twórczy wkład w rozwój nauki o niezawodności.

2. Koncepcja i plan badań

Cel badawczy projektu jakim jest opracowanie nowej całościowej metodyki (w tym miar, metod i algorytmów) oceny ważności elementów i grup elementów w CTS zostanie zrealizowany poprzez wykonanie zadań szczegółowych projektu.

Opracowane w ramach projektu miary ważności będą ujmowały szereg kryteriów ważności, które nie były uwzględnione w dotychczas znanych w teorii niezawodności miarach ważności np. Birnbauma, Vesely-Fussella, Parlowa-Proschana, Natviga itp.

Wyjściowa ważność elementów zostanie określona w oparciu o niezawodność danego elementu $F_i(t)$ oraz ilość ścieżek zdadności x_i , w których uczestniczy i -ty element spośród x wszystkich ścieżek zdadności systemu:

$$I(t) = f[F_i(t), x_i, x] \quad (1)$$

Wnioskodawca proponuje wprowadzenie miar opisujących ważność elementu z uwzględnieniem odpowiednich kryteriów, co zostanie określone poprzez wprowadzenie odpowiednich współczynników wagowych dla różnych kryteriów, takich jak kryterium nakładu czasu pracy, nakładu udziału personelu, obsługiwalności, czasu dostawy części zamiennych, ekonomiki obsługi oraz bezpieczeństwa eksploatacji. Ważność elementu można wówczas opisać pewną funkcją postaci:

$$I^{KRYT}(t) = f[F_i(t), x_i, x, c_t(t), c_p(t), c_m(t), c_s(t), c_e(t), c_b(t)] \quad (2)$$

Współczynnik wagowy nakładu czasu pracy dla wykonania odnowy elementu przyjęto w postaci:

$$c_t(t) = \frac{t_i(t)}{\max_{k=1...n}[t_k(t)]} \quad (3)$$

gdzie: t_i – średni czas odnowy i -tego elementu.

Współczynnik wagowy udziału personelu dla wykonania odnowy elementu przyjęto w postaci:

$$c_p(t) = \frac{p_i(t)}{\max_{k=1...n}[p_k(t)]} \quad (4)$$

gdzie: p_i – średnia ilość osób niezbędnych do realizacji odnowy i -tego elementu

Współczynnik wagowy obsługiwalności w ramach odnowy elementu przyjęto w postaci:

$$c_o(t) = \frac{t_i(t)p_i(t)}{\max_{k=1..n}[t_k(t)p_k(t)]} \quad (5)$$

Współczynnik wagowy czasu oczekiwania na części zamienne dla wykonania odnowy (naprawy) elementu przyjęto w postaci:

$$c_s(t) = \frac{s_i(t)}{\max_{k=1..n}[s_k(t)]} \quad (6)$$

gdzie: s_i – średni czas oczekiwania na dostarczenie części zamiennych dla realizacji odnowy (naprawy) i -tego elementu.

Współczynnik wagowy ekonomiki obsługi elementu przyjęto w postaci:

$$c_e(t) = \frac{m_i(t)}{\max_{k=1..n}[m_k(t)]} \quad (7)$$

gdzie: m_i – średni całkowity koszt przeprowadzenia obsługi dla i -tego elementu

Współczynnik wagowy bezpieczeństwa eksploatacji elementu przyjęto w postaci:

$$c_b(t) = \frac{b_i(t)}{\max_{k=1..n}[b_k(t)]} \quad (8)$$

gdzie: b_i – prawdopodobieństwo, że uszkodzenie i -tego elementu doprowadzi system do stanu zagrożenia bezpieczeństwa.

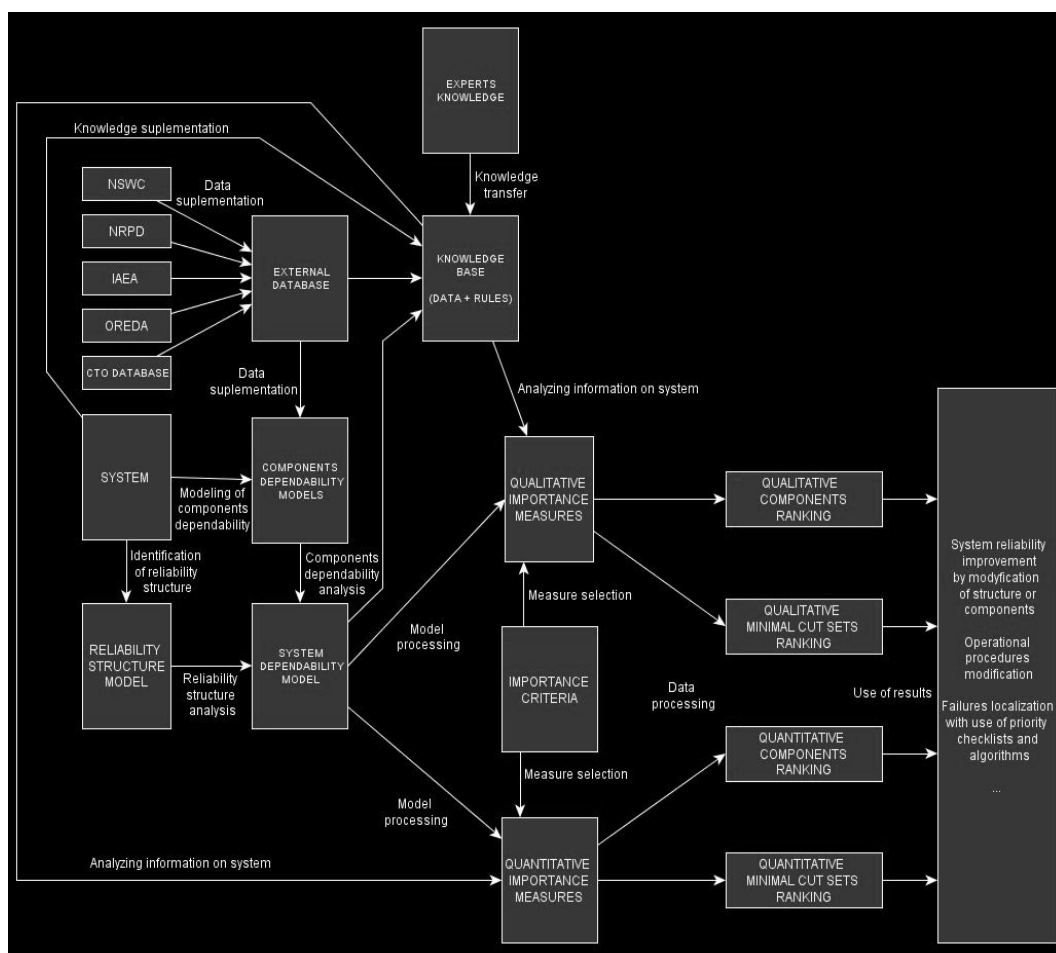
Znalezienie odpowiednich postaci funkcyjnych będzie jednym z zadań zrealizowanych w ramach projektu. Brak pełnych informacji o relacjach w systemie i uszkodzalności poszczególnych elementów systemu zostanie skompensowany modelami jakościowymi (całościowymi – jakościowo-ilościowymi) oraz wiedzą ekspertów opisaną z wykorzystaniem reguł i prawdopodobieństwa subiektywnego.

Opracowane miary zostaną zaaplikowane dla przykładowego CTS, którym będzie siłownia okrętowa morskiego statku transportowego. Koncepcję całościowego podejścia do oceny ważności elementów i grup elementów w CTS wraz z aplikacją wiedzy ekspertów przedstawiono na rys. 1.

Wyniki analizy zostaną ocenione poprzez porównanie uzyskanych rankingów ważności elementów dla różnych wyjściowych informacji o badanym obiekcie, w tym w szczególności:

- znane zgrubne informacje o elementach funkcjonalnych w systemie,
- znana struktura niezawodnościowa systemu,
- znana uszkodzalność wybranych elementów i zgrubne relacje pomiędzy elementami systemu,
- znana struktura niezawodnościowa systemu oraz uszkodzalność wybranych elementów systemu.

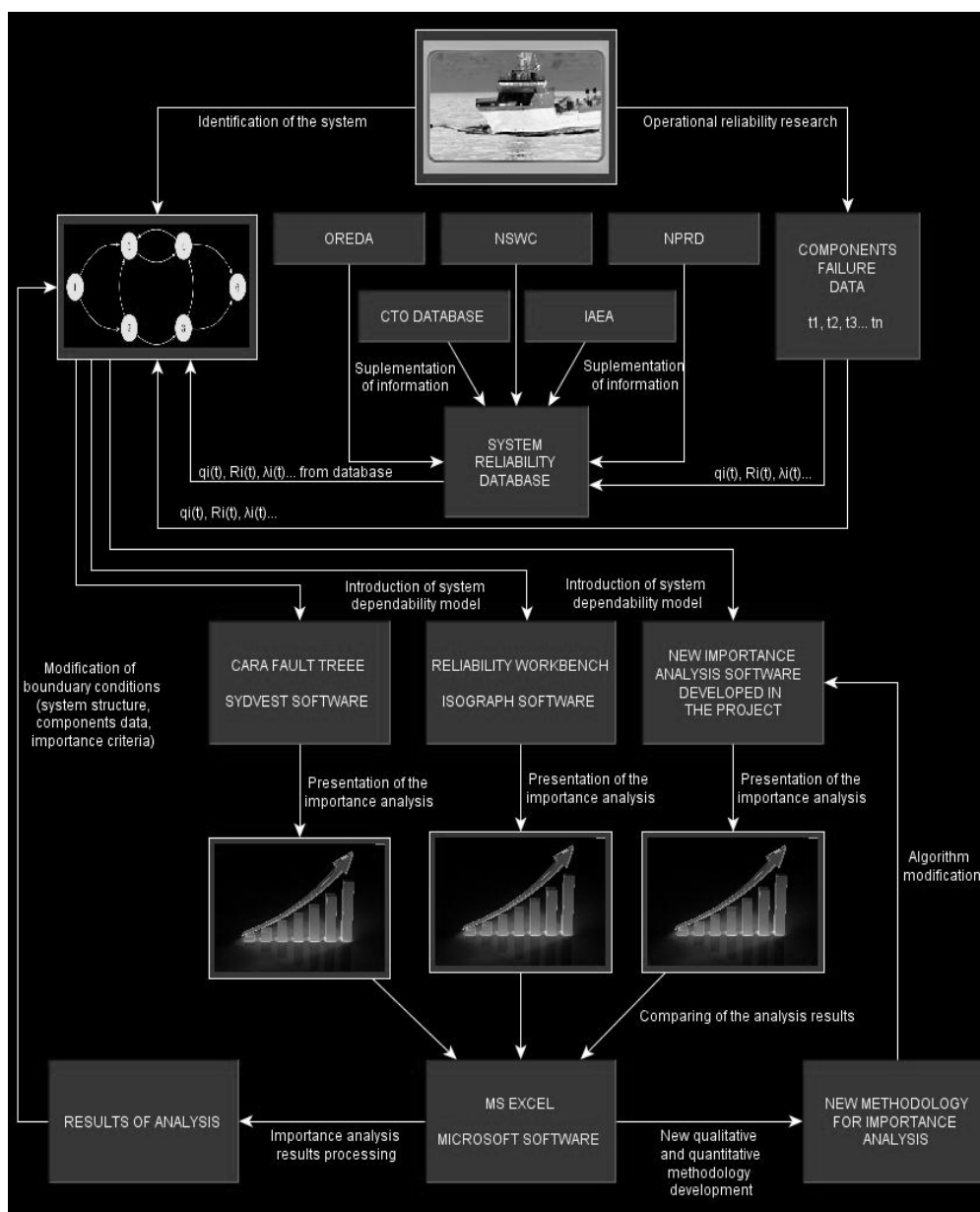
Uzyskane wyniki zostaną skonfrontowane z wiedzą ekspertów. Wskaźniki porównawcze uzyskane w wyniku konsultacji z ekspertami zostaną wyznaczone wykorzystując prawdopodobieństwo warunkowe. Przebieg realizacji projektu badawczego przedstawiono na rys. 2.



Rysunek 1. Proponowana całościowa analiza ważności, wykorzystująca modele jakościowe i ilościowe

Źródło: Opracowanie własne.

Wyniki badań wstępnych [6], [11] wskazują na słuszność przyjętych założeń i brak możliwości oceny ważności elementów i grup elementów w strukturze niezawodnościowej CTS z wykorzystaniem klasycznej metodyki.



Rysunek 2. Przebieg realizacji projektu prowadzącego do opracowania nowoczesnej całościowej metodyki oceny ważności elementów i grup elementów w CTS

Źródło: Opracowanie własne.

3. Metodyka badań

Głównym celem projektu jest rozwinięcie aktualnego stanu nauki w zakresie niezawodnościowej oceny ważności, co zostanie zrealizowane poprzez opracowanie sformułowań teoretycznych oraz metod, które umożliwiają ilościową i jakościową ocenę ważności elementów złożonych systemów technicznych (CTS). W ramach projektu zostaną opracowane i upowszechnione nowe narzędzia (algorytmy i specjalistyczne oprogramowanie) do oceny ważności elementów w CTS. Opracowane narzędzia zostaną wykorzystane w ocenie ważności elementów siłowni okrętowej jako przykład aplikacyjny. W wyniku realizacji projektu powstanie monografia habilitacyjna wykonawcy. Dotychczas autor zrealizował zadania wstępne, niezbędne dla celów realizacji projektu, takie jak:

- identyfikacja czynników uzasadniająca potrzebę zmodyfikowania narzędzi oceny ważności elementów i grup elementów w CTS,
- przegląd znanych miar ważności i modeli struktury dla CTS oraz krytyczna analiza literaturowa osiągnięć wcześniejszych badaczy tematyki oceny ważności elementów w CTS,
- uporządkowanie terminologii w zakresie analizy ważności elementów i opisu struktury niezawodnościowej systemów,
- zebranie danych statystycznych o uszkodzeniach elementów systemów siłowni okrętowych.

Główny cel projektu zostanie zrealizowany poprzez wykonanie poszczególnych zadań szczegółowych, którymi są:

- opracowanie nowych miar ważności elementów systemu dla różnych kryteriów ważności (w tym obsługiwalności i ekonomiczności eksploatacji) stanowiących alternatywę dla obecnie stosowanych miar ważności.
- opracowanie nowych modeli (sposobu opisu) struktury niezawodnościowej i rezerwowania w CTS, m.in. poprzez wdrożenie autorskich propozycji wykorzystania płaszczyzny liczb zespolonych [7], zastosowanie wektora zdarzeń zewnętrznych [9], [10] i zastosowanie zmodyfikowanej miary rezerwowania Jaźwińskiego-Smalko [14];
- opracowanie całościowego podejścia do oceny ważności elementów systemu poprzez zastosowanie modeli ilościowo-jakościowych; ocena ważności elementów proponowanymi metodami dla wybranych systemów technicznych (egzemplifikacja na przykładzie siłowni okrętowej);
- ocena wpływu zastosowanej metodyki i doboru miar ważności na uzyskane rankingi ważności elementów i grup elementów poprzez wzajemne porównanie uzyskanych rankingów;
- dyskusja na temat znanych i nowo opracowanych metod oceny ważności elementów w strukturze niezawodnościowej systemów oraz przykłady egzemplifikacyjne;
- budowa ogólnego algorytmu oceny ważności elementów, w tym doboru metodyki i miar dla oceny ważności w zależności od posiadanych informacji;
- publikacja wyników projektu w artykułach naukowych i wydanie monografii habilitacyjnej.

Podstawę naukowego warsztatu wykonawcy projektu, potrzebnego do realizacji postawionych w ramach projektu zadań, stanowią:

- znajomość teorii niezawodności oraz zagadnień fizyki uszkodzeń, bezpieczeństwa i eksploatacji systemów technicznych, w ramach których koncentrują się zainteresowania naukowe wnioskodawcy;
- znajomość zagadnień teorii prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej;
- doświadczenie w ocenie niezawodności i gotowości złożonych systemów technicznych, które autor zebrał i rozwinął w ramach pracy magisterskiej, rozprawy doktorskiej, zrealizowanych projektów i aktualnie kierowanego przez wnioskodawcę tematu badań statutowych;
- duże doświadczenie w zakresie znajomości problemów eksploatacji CTS (siłowni okrętowych), w związku z kilkuletnim doświadczeniem zawodowym jako inżynier mechanik okrętowy;
- doświadczenie w korzystaniu z niezawodnościowych baz danych, w tym NRPD, OREDA, CTO, NSWC, IAEA itp.;
- umiejętność obsługi profesjonalnych pakietów do analizy niezawodnościowej, w tym Isograph Reliability Workbench, Isograph Isolib Parts, CARA Fault Tree, Raptor, Galileo itd.;
- znajomość arkusza kalkulacyjnego Microsoft Excel, w którym realizowane są analizy porównawcze;
- przeprowadzone przez wnioskodawcę wstępne badania uzasadniające potrzebę realizacji projektu;
- opracowane przez wnioskodawcę programy komputerowe wspomagające analizy niezawodnościowe, m.in. Bramki, Przekroje, Ważność;
- zebrana przez wnioskodawcę duża ilość danych statystycznych o uszkodzeniach w CTS (siłowni okrętowe i ich podsystemy);
- doświadczenie wnioskodawcy w prowadzeniu analiz niezawodnościowych oraz budowie modeli struktury niezawodnościowej i metod analizy ważności elementów oraz gotowości i niezawodności CTS.

W ramach badań przedmiotem analizy będzie siłownia okrętowa statku transportowego jako przykład CTS. Pierwszym etapem badań było rozeznanie tematyki, kolejne działania będą polegały na opracowaniu nowych miar ważności i algorytmów postępowania w ocenie ważności elementów i grup elementów w CTS, co zostanie zrealizowane metodami syntezy aktualnych miar ważności oraz z ilościowych i jakościowych charakterystyk niezawodności obiektu badań. Uzyskane miary wykorzystane zostaną do oszacowania wartości ważności i zbudowania rankingów ważności elementów. Brak pełnych informacji o systemie zostanie skompensowany poprzez uzupełnienie tych informacji korzystając z bazy wiedzy (informacje zbierane na bieżąco z systemu oraz wiedza ekspertów). Wiedza ekspertów zostanie wprowadzona do analizy z wykorzystaniem osiągnięć teorii prawdopodobieństwa subiektywnego. Jako wyniki porównawcze sporządzone zostaną analogiczne rankingi w oparciu o znane dotychczas miary ważności elementów.

W ramach projektu dokonane będzie porównanie uzyskanych rankingów z poszczególnych analiz ważności dla różnych wyjściowych danych o obiekcie analizy. Porównanie zostanie skwantyfikowane poprzez obróbkę statystyczną wyników uzyskaną w oparciu o poszczególne miary ważności.

W badaniach zostanie wykorzystane profesjonalne oprogramowanie do analizy niezawodnościowej znanych na całym świecie firm: Isograph Software (Reliability Workbench, biblioteki Iso-lib) oraz Sydvest Software (Fault Tree Analysis Academic Version), a także autorskie programy wykonawcy projektu. Analizy porównawcze realizowane w ramach projektu będą wykonane z wykorzystaniem arkusza kalkulacyjnego MS Excel. Wszystkie wymienione programy są w posiadaniu wnioskodawcy projektu.

W ramach realizacji projektu zostanie opracowane nowoczesne oprogramowanie służące do analizy ważności CTS, w którym zaimplementowana zostanie proponowana całościowa metoda oceny ważności.

4. Wnioski końcowe

Realizacja projektu przyczyni się w sensie naukowym do opracowania nowoczesnych metod, modeli i miar, które pozwolą na ocenę ważności elementów w strukturze niezawodnościowej CTS. Ponadto realizacja projektu przyczyni się do: krytycznej oceny aktualnych osiągnięć naukowych w dziedzinie analizy ważności; porównania i oceny przydatności różnych metod oceny i miar ważności; wypracowania algorytmu racjonalnej oceny ważności elementów i grup elementów w CTS w zależności od posiadanych o systemie informacji oraz ujednoczenia terminologii w obszarze analizy ważności

W wyniku realizacji projektu uzyska się szereg wyników statystycznych przydatnych w dalszych badaniach, takich jak: dane o uszkodzeniach elementów analizowanych CTS, oszacowanie niezawodności i gotowości analizowanych CTS, rankingi ważności elementów w analizowanych CTS oraz porównanie wyników oceny ważności uzyskanych różnymi metodami i dla różnych kryteriów ważności systemu.

Wobec podstawowego charakteru opracowanych w ramach projektu zagadnień, realizacja projektu pozwoli na opracowanie metodyki rozwijających nauk oraz znajdujących zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Dzięki interdyscyplinarności zagadnień będących przedmiotem projektu, wykonanie zadań cząstkowych wpłynie na rozwój cywilizacji i społeczeństwa korzystającego w wielu aspektach codziennego życia ze złożonych obiektów eksploatacji. Rezultaty mogą być zastosowane w projektowaniu nowych systemów oraz w eksploatacji systemów istniejących (ocena stanu technicznego systemu, opracowanie procedur eksploatacyjnych i modyfikacja systemu w celu podwyższenia niezawodności).

W odniesieniu do CTS (m.in. siłowni okrętowych) realizacja projektu da użyteczne rezultaty, dzięki opracowanej metodzie przydatnej dla:

- wspomaganie personelu zarządzającego CTS jako narzędzie oceny wdrażanych i będących w użyciu harmonogramów przeglądów maszyn i urządzeń oraz dla opracowania nowych racjonalnych harmonogramów;
- wspomaganie eksploatatorów CTS diagramom, wykresom, priorytetowym listom sprawdzeń oraz procedurom eksploatacyjnym stworzonym w oparciu o wyniki analizy ważności elementów w strukturze niezawodnościowej systemu.

Wymiernym rezultatem projektu będzie publikacja wyników badań i przydatności opracowanych modeli. Wkład twórczy będący rezultatem niniejszego projektu zostanie upowszechniony w publikacjach naukowych o zasięgu krajowym i światowym, przedstawiony na polskich i zagra-

nicznych konferencjach tematycznych ("Fizyka uszkodzeń", "Risk, Quality, Reliability" itp.) oraz finalnie wydanie monografii naukowej wykonawcy projektu (publikacja książkowa o objętości ok. 10 arkuszy wydawniczych, jako miejsce wydania przewiduje się wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu). Zebrany w ramach projektu materiał będzie podstawą do uzyskania habilitacji przez wykonawcę projektu.

Bibliografia

- [1] Andrews J. D.: Birnbaum and criticality measures of component contribution to the failure of phased missions. *Reliability Engineering and System Safety*, 93 (2008), s. 1861–1966.
- [2] Barlow R. E., Proschan F.: Importance of system components and fault tree events. *Stochastic Processes and their Applications*, Vol. 3, 1975, s. 153–173.
- [3] Birnbaum Z. W.: On the importance of different components in a multicomponent system. in Krishnaiah PR, editor, *Multivariate analysis-II*, New York, NY, USA; Academic Press: 1969. s. 581–92.
- [4] Borgonovo E., Apostolakis G.E.: A New importance measure for risk-informed decision making. *Reliability Engineering and System Safety*, 72 (2001), s. 193–212.
- [5] Borgonovo E, Apostolakis G.E., Tarantola S., Saltelli A.: Comparison of global sensitivity analysis techniques and importance measures in PSA. *Reliability Engineering and System Safety* 79 (2003), s. 175–185.
- [6] Chybowski L., Matuszak Z.: Reliability Importance Analysis Of Technical Systems Elements. *Proceedings of V-th International Conference Safety Management at Sea and Maritime Specialist Training SSN 2005. BGARF, Kaliningrad 2006.* s. 126–129.
- [7] Chybowski L., Matuszak Z.: A Particular Model of Redundancy Useful in the Assessment of Operational Reliability and Safety of a Dynamic Positioning System of an Offshore Vessel. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2006, Vol. 15, No. 4B, s. 27–34.
- [8] Chybowski L.: Azimuth Thruster Hydraulic Instalations Reliability Model. *BAME, KGTU, Kaliningrad 2006*, s. 103–109
- [9] Chybowski L.: Assessment of Reliability and Availability of Fishing Vessels Power, Propulsion and Technological Plants Based on Fault Tree Analysis. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2009, Vol. 18, No. 2A, s. 39–44.
- [10] Chybowski L.: Application of External Events Vectors for Defining Reliability Structure of Fishing Vessels Power, Propulsion and Technological Plants. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2009, Vol. 18, No. 2A, s. 45–50. [ISSN 1230-1485]
- [11] Chybowski L., Matuszak Z.: Reliability importance analysis of marine technical systems elements. *Autobusy 6/2010. CD-ROM.*
- [12] Espiritu J.F., Coit d.W., Prakash U.: Component criticality importance measures for the power industry. *Electric Power Systems Research* 77 (2007) 407–420.
- [13] Jaźwiński J., Borgoń J.: *Niezawodność eksploatacyjna i bezpieczeństwo lotów.* WKiŁ, Warszawa 1989.
- [14] Jaźwiński J., Smalko Z.: *Rozważania na temat właściwości systemów nadmiarowych.* VIII Konferencja Okrętownictwo i Oceanotechnika, Perspektywy rozwoju systemów transportowych. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2006.

- [15] Karpiński J., Korczak E.: Motody oceny niezawodności dwustanowych systemów technicznych. Instytut Badań Systemowych PAN, Omnitech Press, Warszawa 1990, s. 162–165.
- [16] Kim K., Han S.: A study on importance measures and a quantification algorithm in a fire PRA model. *Reliability Engineering and System Safety* 94 (2009), s. 969–972.
- [17] Meng F.C.: Relationships of Fussell–Vesely and Birnbaum importance to structural importance in coherent systems. *Reliability Engineering and System Safety* 67 (2000), s. 55–60.
- [18] Vesely W.E.: Supplemental viewpoints on the use of importance measures in risk-informed regulatory applications, *Reliability Engineering and System Safety* 60 (1998), s. 257–259.

QUALITATIVE-QUANTITATIVE ANALYSIS OF COMPONENTS IMPORTANCE IN SYSTEMS' RELIABILITY STRUCTURE

Summary

Paper presents conception of research project for development of new methodology for components importance in the reliability structure of complex technical systems. Main aims of project, research plan and final results have been shown.

Keywords: importance measure, reliability structure, complex technical system

Leszek Chybowski
Zakład Siłowni Okrętowych
Instytut Eksploatacji Siłowni Okrętowych
Wydział Mechaniczny
Akademia Morska w Szczecinie
ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-750 Szczecin
e-mail: l.chybowski@am.szczecin.pl