

TENDENCJE ROZWOJOWE W OCENIE WAŻNOŚCI ELEMENTÓW I GRUP ELEMENTÓW W STRUKTURZE NIEZAWODNOŚCIOWEJ SYSTEMÓW

LESZEK CHYBOWSKI

Streszczenie

Artykuł przedstawia rozwój metod oceny ważności elementów i grup elementów w strukturze niezawodnościowej systemu. Przedstawiono wybrane miary ilościowe i jakościowe oraz metodykę jakościowej i ilościowej analizy ważności. Zarysowano tendencje rozwojowe w analizie ważności. Przedstawiono krytykę znanych miar w aspekcie użytkowym.

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

1. Wprowadzenie

Warunkiem bezpiecznej i efektywnej eksploatacji złożonych systemów technicznych (CTS) jest ich wysoka niezawodność. Często zachodzi potrzeba podwyższenia niezawodności systemu poprzez modyfikację struktury systemu lub podwyższenie niezawodności wybranych elementów. Zwykle podczas analizy niezawodności systemu technicznego analitykowi zależy na znalezieniu najbardziej czułych komponentów (miary ważności elementów), których niezawodność należy poprawić w celu podniesienia niezawodności całego systemu w sposób optymalny [6], [11], [15]. Analogicznie rozważa się ważność przekrojów minimalnych (lokalne miary ważności). Problematyka ta powiązana jest z poszukiwaniem tzw. słabych ogniw w systemie, czyli najbardziej zawodnych elementów i grup elementów w systemie (tzw. analiza ważności).

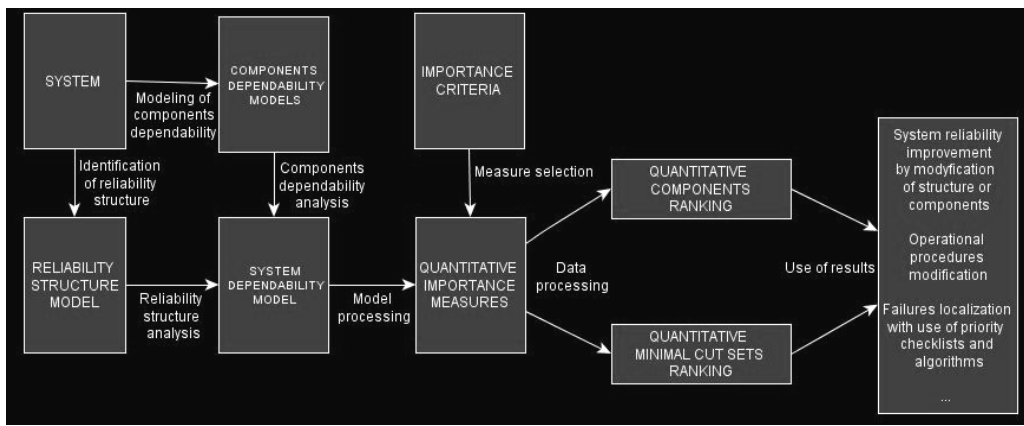
Generalnie, ważność komponentu w rozważanym systemie (z punktu widzenia niezawodności) uzależniona jest od dwu czynników:

- wartości niezawodności komponentu,
- struktury niezawodnościowej w jakiej zlokalizowany jest komponent.

Wpływ pierwszego z wymienionych czynników jest oczywisty. Odnośnie umiejscowienia elementu w strukturze niezawodnościowej należy zwrócić uwagę, iż element jest tym ważniejszy, im bardziej przypomina on samodzielny element włączony szeregowo w strukturę systemu. Jego znaczenie (wpływ na zmianę niezawodności systemu) maleje wraz ze wzrostem poziomu jego rezerwowania.

2. Ilościowa ocena ważności

Dysponując informacjami o strukturze niezawodnościowej systemu oraz o charakterystykach niezawodnościowych elementów systemu możliwe jest wyznaczenie ilościowych miar ważności elementów i grup elementów w systemie. Proces ilościowej analizy ważności przedstawiono na rys. 1.



Rysunek 1. Ilościowa analiza ważności elementów i grup elementów w strukturze niezawodnościowej systemu

Źródło: Opracowanie własne.

W 1969 roku Z. W. Birnbaum w pracy [3] opublikował historycznie pierwszą miarę ważności elementów w strukturze niezawodnościowej systemu, którą zdefiniował jako różnicę pomiędzy niezawodnością systemu, gdy i -ty element jest w stanie niezdatności w chwili t oraz niezawodnością systemu, gdy i -ty komponent jest zdalny w chwili t :

$$I_i^B(t) = \frac{\partial R[\bar{r}(t)]}{\partial r_i(t)} \quad (1)$$

gdzie: $\bar{r}(t) = [r_1(t), r_2(t), \dots, r_n(t)]$ – wektor niezawodności elementów systemu w chwili t ,
 $R[\bar{r}(t)]$ – niezawodność systemu.

Miara Birnbauma jest zależna tylko od struktury w jakiej jest zlokalizowany element i od niezawodności pozostałych elementów, natomiast nie jest ona zależna od niezawodności rozpatrywanego i -tego elementu.

W 1975 roku H.E. Lambert wprowadził pojęcie elementu krytycznego dla systemu, czyli takiego który będąc w stanie niezdatności spowoduje niezdatność systemu. Wprowadził on miarę krytyczności, którą można zdefiniować jako, prawdopodobieństwo, że i -ty element jest krytycznym dla systemu i uszkadza się w czasie t , przy założeniu, że system ulega uszkodzeniu w czasie t . Miarę krytyczności można powiązać z niezawodnościową miarą Birnbauma następującym wyrażeniem:

$$I^{CR}(i|t) = \frac{I^B(i|t) \cdot [1 - R_i(t)]}{[1 - R(t)]} \quad (2)$$

gdzie: R_i – niezawodność i-tego elementu.

W kolejnych latach powstały nowe miary ważności, w tym miary opracowane przez R.E. Barlowa oraz F. Proschana, m.in. niezależna od czasu eksploatacji miara [2]:

$$I_i^{B-P} = \int_0^{\infty} f_i(t) \cdot I_i^B(t) \cdot dt \quad (3)$$

gdzie: f_i – gęstość prawdopodobieństwa długości czasu do uszkodzenia i-tego elementu

Miara Barlowa-Proschana jest równa prawdopodobieństwu, że przyczyną uszkodzenia systemu jest uszkodzenie i-tego elementu. Miara ta może być traktowana jako uśredniona miara Birnbauma ze względu na zawodność elementu $F_i(t)$.

Pod koniec lat 70-tych XX wieku B. Natvig [15] opracował nową niezawodnościową miarę ważności, w której ważność elementu uzależnił od ubytku pozostałego czasu poprawnej pracy systemu spowodowanego przejściem rozpatrywanego elementu do stanu niezdatności, co można przedstawić dla niezależnych uszkodzeń w systemie, w postaci:

$$I_i^N = k_N \int_0^{\infty} R_i(t) \cdot \{-\ln[R_i(t)]\} \cdot I_i^B(t) \cdot dt \quad (4)$$

gdzie: k_N – współczynnik zapewniający sumowanie miar do jedności.

Kolejną szerzej znaną miarę zaproponował B. Bergman w 1987 roku [15]:

$$I_i^E = k_E \int_0^{\infty} t \cdot f_i(t) \cdot I_i^B(t) \cdot dt \quad (5)$$

gdzie: k_E – współczynnik zapewniający sumowanie miar wszystkich elementów systemu do jedności.

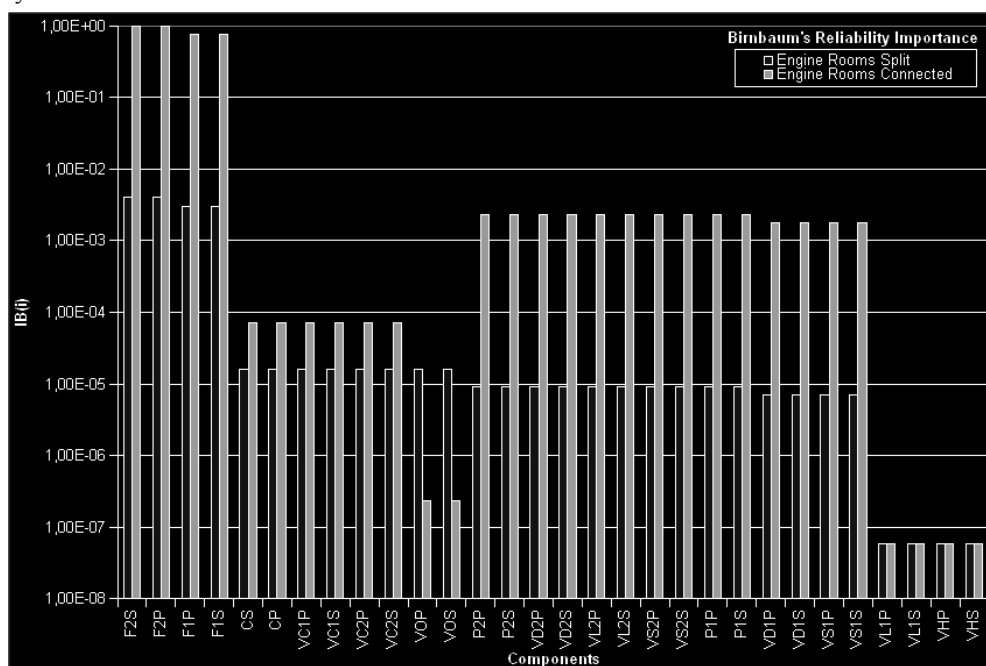
Problematyka oceny ważności rozwijana była w kolejnych latach i opisane miary zostały uogólnione do zastosowania dla systemów odnawialnych poprzez zastąpienie funkcji niezawodności oraz zawodności funkcjami gotowości i niegotowości. Jedną z powszechnie stosowanych ilościowych miar ważności dla systemów odnawialnych jest miara Vesely-Fussella $I_i^{VF}(t)$ dla i-tego zdarzenia jest definiowana jako prawdopodobieństwo warunkowe, że zaistnieje co najmniej jeden przekrój minimalny zawierający i-ty element w chwili t , przyjmując, że system przechodzi w stan niezdatności w chwili t . Miara Vesely-Fussella może być interpretowana jako prawdopodobieństwo, uszkodzenia systemu z powodu niezdatności i-tego elementu, przy założeniu, że system uszkadza się w chwili t .

Dla analiz numerycznych przyjmuje się zwykle przybliżoną formułę:

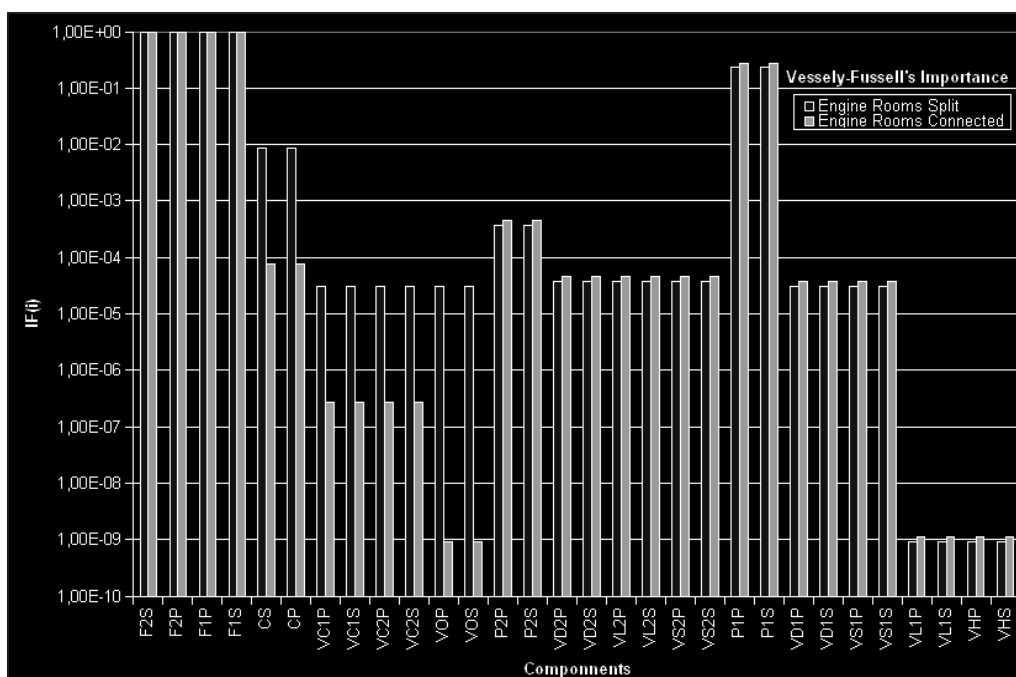
$$I^{VF}(i|t) \approx \frac{\sum_{j=1}^{m_i} \tilde{Q}_j(t)}{Q_0(t)} \quad (6)$$

gdzie: $\tilde{Q}_j(t)$ – niegotowość j-tego przekroju minimalnego zawierającego i-ty element,
 $Q_0(t)$ – niegotowość systemu.

Należy podkreślić fakt, iż różne miary niezawodnościowe prowadzą do różnych rankingów ważności, co wynika z różnych definicji miar, dlatego też należy wziąć pod uwagę charakter danej miary dokonując interpretacji uzyskanych w czasie analizy wyników. Dla wskazania elementów systemu, których parametry niezawodnościowe powinny zostać poprawione aby podwyższyć niezawodność systemu najbardziej przydatna wydaje się niezawodnościowa miara Birnbauma oraz miary Barlowa-Proschana, natomiast przy poszukiwaniu elementów, których uszkodzenie z największym prawdopodobieństwem spowoduje awarię systemu zaleca się korzystanie z miary Veselya i Fussell'a oraz miary krytyczności. Przykładowe rankingi zdarzeń dla elementów instalacji chłodzenia wodą morską statku [11] dla różnych miar i różnych stanów systemu przedstawiono na rys. 2. i 3.



Rysunek 2. Ranking ważności elementów instalacji chłodzenia wodą morską siłowni statku, oparty na niezawodnościowej mierze Birnbauma [11]



Rysunek 3. Ranking ważności elementów instalacji chłodzenia wodą morską siłowni statku, oparty na niezawodnościowej mierze Vessely-Fussella [11]

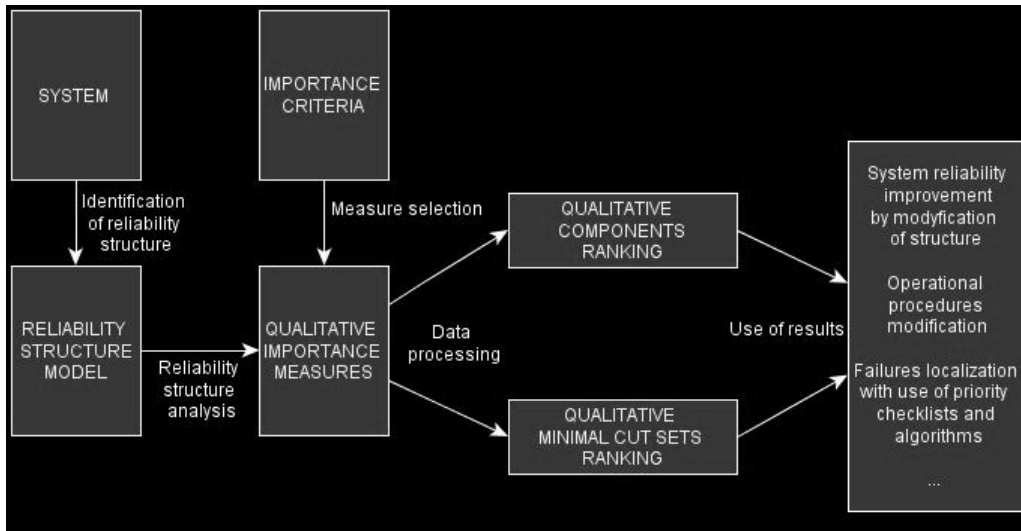
3. Jakościowa ocena ważności

Stosowalność ilościowych miar jest bardzo ograniczona, gdyż wymaga dokładnej znajomości charakterystyk niezawodnościowych poszczególnych elementów oraz całego systemu. W odniesieniu do CTS zwykle nie posiada się informacji o gęstości prawdopodobieństwa długości czasu do uszkodzenia, postaci funkcyjnej funkcji niezawodności poszczególnych elementów itp. Pewnym rozwiązaniem było zastosowanie metod jakościowych opisujących ważność danego elementu jedynie w odniesieniu do położenia rozpatrywanego elementu w strukturze niezawodnościowej systemu, jednak brak informacji o uszkodzalności elementów powoduje, że miary te mają ograniczoną stosowalność. Proces jakościowej analizy ważności przedstawiono na rys. 4.

Przykładem jakościowej miary ważności elementów (zależnej jedynie od struktury niezawodnościowej, w której element jest zlokalizowany) jest strukturalna miara ważności Birnbauma, która dla i -tego komponentu definiowana jest jako względna liczba stanów n -elementowego systemu dla których i -ty komponent jest krytycznym dla systemu (czyli stanów w których niezdatność elementu spowoduje niezdatność systemu). Miarę tę można opisać następującą zależnością:

$$B_{\phi}(i) = \frac{\eta_{\phi}(i)}{2^{n-1}} \quad (7)$$

gdzie: $\eta_{\phi}(i)$ jest całkowitą liczbą wektorów ścieżek krytycznych dla komponentu i .



Rysunek 4. Jakościowa analiza ważności elementów i grup elementów w strukturze niezawodnościowej systemu

Źródło: Opracowanie własne.

Chybowski i Matuszak zaproponowali unormowaną miarę biorącą pod uwagę udział i -tego elementu w strukturze kilku podsystemów [11]. Jeśli s_{i1} określa ilość wejściowych strumieni energetycznych do elementu, a s_{i2} ilość wyjściowych strumieni energetycznych odprowadzonych z elementu to ważność elementu można przedstawić dla danej chwili t w postaci:

$$I_i^S(t) = k_S [s_{i1}(t) + s_{i2}(t)] \quad (8)$$

$$k_S = \left\{ \sum_{i=1}^n [s_{i1}(t) + s_{i2}(t)] \right\}^{-1}$$

gdzie:

– współczynnik zapewniający sumowanie miar do jedności.

W odniesieniu do oceny grup elementów można rozpatrywać m.in. ważność przekrojów minimalnych niezdatności (zbiorów elementów, których jednoczesne uszkodzenie spowoduje uszkodzenie systemu). Ważność przekroju minimalnego interpretuje się jako warunkowe prawdopodobieństwo, że k -ty przekrój minimalny wystąpi w chwili t , przyjmując, że system uszkadza się w chwili t . Ważność przekroju minimalnego o niegotowości Q_k opisuje formuła:

$$I^{CI}(k, t) = \frac{\tilde{Q}_k(t)}{Q_0(t)} \quad (9)$$

Jakościową miarą ważności charakteryzującą minimalne przekroje niezdatności jest liczebność przekroju (rząd przekroju), przekrój zwykle jest tym ważniejszy im mniejszą ilość elementów zawiera. Jednym z zagadnień oceny ważności elementów jest tworzenie rankingów elementów oraz

zdarzeń prowadzących do uszkodzeń w systemie. Z uwagi na rodzaj zdarzenia można przyjąć określone priorytety i utworzyć rankingi elementów, a następnie przekrojów minimalnych. Przykład takiego rankingu zdarzeń przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Ranking zdarzeń dla analizy jakościowej przekrojów minimalnych

Priorytet zdarzenia pierwotnego	Typ zdarzenia
1	Błąd człowieka (operatora)
2	Uszkodzenie komponentu aktywnego
3	Uszkodzenie komponentu biernego

Źródło: J. Vatn, 1992 [18].

Przedstawiony ranking zdarzeń opiera się na założeniu, że błędy człowieka występują znacznie częściej niż uszkodzenia komponentów aktywnych, a uszkodzenia komponentów aktywnych są częstsze niż komponentów biernych. Przykładowo pracująca pompa jest znacznie bardziej podatna na uszkodzenia niż pompa rezerwowa. W oparciu o powyższy ranking możliwe jest jakościowe sklasyfikowanie ważności przekrojów minimalnych złożonych z dwóch i więcej zdarzeń pierwotnych. Tabela 2 przedstawia rangi dwuelementowych przekrojów minimalnych.

Tabela 2. Rangi przekrojów minimalnych złożonych z dwóch zdarzeń pierwotnych

Ranga przekroju minimalnego	Typ zdarzenia pierwotnego nr 1	Typ zdarzenia pierwotnego nr 2
1	Błąd człowieka	Błąd człowieka
2	Błąd człowieka	Uszkodzenie komponentu aktywnego
3	Błąd człowieka	Uszkodzenie komponentu biernego
4	Uszkodzenie komponentu aktywnego	Uszkodzenie komponentu aktywnego
5	Uszkodzenie komponentu aktywnego	Uszkodzenie komponentu biernego
6	Uszkodzenie komponentu biernego	Uszkodzenie komponentu biernego

Źródło: J. Vatn 1992 [18].

4. Uwagi końcowe

W latach 90-tych oraz ostatniej dekadzie powstało wiele teoretycznych prac dotyczących analizy ważności i zagadnień powiązanych, w tym prace autorstwa: E. Zio, G.E. Apostolakis, E. Boronovo, T. Aven, K. Kołowrocki, F. C. Meng, W. E. Vesely, J. Vatn, Z. Matuszak, P. J. Boland [1], [4], [5], [12], [16], [17], [19].

Pośród tendencji w analizie ważności elementów wyróżnić można prace rozwijające nowe miary m.in. [4], [5], [11], [19] prace przedstawiające określone zastosowania miar w ocenie bezpieczeństwa danej klasy systemów m.in. [5], [11], [12], [15], [19] oraz dogłębne analizy matematyczne związków pomiędzy różnymi miarami ważności i uzyskiwanych w oparciu o nie rankingów zdarzeń m.in. [1], [11], [17].

W XXI wieku pojawiło się inne poruszane przez badaczy (m.in. S. Beeson, J.D. Andrews) zagadnienie w rozwoju metod analizy ważności elementów, którym jest rozwinięcie metodyki oceny ważności na systemy niekoherentne (systemy, w których uszkodzenie elementu może spowodować przejście systemu do stanu zdatności). Analiza ważności dla takich systemów wiązała się z znaczną komplikacją aparatu matematyczny, gdyż dla każdego elementu należy wyznaczyć dwie miary

związane z przebywaniem elementu odpowiednio w stanie niezdatności i stanie zdatności. Takie podejście znacznie skomplikowało również możliwości interpretacyjne uzyskiwanych wyników. Jednak pomimo rozwiniętego aparatu metody te mają zastosowanie tylko teoretyczne, z uwagi na to, że CTS poza nielicznymi przypadkami są systemami koherentnymi.

Na przestrzeni ostatnich ponad 40 lat od wprowadzenia pierwszej miary ważności przez Z.W. Birnbauma opracowano szereg miar opisujących ważność elementu w strukturze niezawodnościowej systemu oraz ważność przekrojów minimalnych niezdatności. Jednak pomimo zaawansowanego matematycznego (teoretycznego) aparatu oceny ważności, stwarzają one znaczne problemy aplikacyjne. Zastosowanie znanych miar ważności często jest ograniczone lub niemożliwe z uwagi na brak pełnych informacji o relacjach w systemie i uszkodzalności jego elementów [7], [8], [9], [10], [13], [14], co czyni znane miary ważności nieprzydatnymi w odniesieniu do CTS. Analiza literaturowa wykonana przez autora wykazuje, że publikacje poświęcone analizie ważności w CTS pojawiały się sporadycznie w związku z przedstawionymi problemami aplikacyjnymi.

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 el-

- ements. 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] Vatn J.: Finding minimal cut sets in a fault tree. *Reliability Engineering and System Safety* 36 (1992), s. 59–62.
 - [19] 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.

**DEVELOPMENT TRENDS IN IMPORTANCE EVALUATION OF COMPONENTS
AND GROUPS OF COMPONENTS IN THE SYSTEMS' RELIABILITY STRUCTURE**

Summary

Paper presents development of methods for assessment or importance of components and groups of components in system reliability structure. Selected importance measures and methods for qualitative and quantitative analysis have been shown. Development trends in importance analysis have been outlined. Critical judgment of practical use of importance measures has been done.

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