

Mirosław Gerigk\*

## METODA OCENY BEZPIECZEŃSTWA OBIEKTÓW OCEANOTECHNICZNYCH ZORIENTOWANA NA OCENĘ ZACHOWANIA SIĘ OBIEKTU I OCENĘ RYZYKA WYPADKU. PROCEDURA ZARZĄDZANIA BEZPIECZEŃSTWEM OBIEKTU

---

### 1. Wprowadzenie

Morza i oceany świata eksploatowane są z uwagi na żywność, zasoby mineralne i energię, co wymaga stałego rozwoju transportu morskiego, w tym statków, i infrastruktury morskiej. Akwenty te odgrywają także coraz ważniejszą rolę z uwagi na rozwój turystyki. Nie należy też zapominać o tym, że nadal obowiązuje zasada strategiczna, że kto rządzi na morzu rządzi lądami.

Obiekty oceanotechniczne powinny charakteryzować się odpowiednimi cechami funkcjonalnymi, efektywnościowymi i tymi związanymi z ich bezpieczeństwem.

Dotyczy to [2, 3, 6]:

- platform i obiektów produkcyjnych: TPG 3300, Spar Truss, TLP-1 Leg, Buoy, Octobuoy, Semi-submersible, Tower, Spar Classic, TLP-3 Leg, TLP-4 Leg, FPSO, SSP buoy;
- statków: zbiornikowce, chemikaliowce, OSV (*Offshore Supply Vassels*), holowniki;
- systemów i obiektów produkcyjnych posadowionych na dnie;
- pływających i stacjonarnych turbin wiatrowych i elektrowni falowych.

Tematyka artykułu ukierunkowana jest na bezpieczeństwo obiektów oceanotechnicznych w stanie uszkodzonym w czasie katastrofy na morzu. Jak poważne mogą być konsekwencje katastrof związanych z eksploatacją obiektów oceanotechnicznych, można zorientować się analizując katastrofy, które miały miejsce na świecie w okresie ostatnich kilku dekad.

---

\* Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa, Politechnika Gdańska, Gdańsk

Za najgroźniejsze w XX i XXI wieku można uznać następujące katastrofy [3, 11]:

- katastrofa zbiornikowca Amoco Cadiz (1978) — do morza dostało się około 223 000 ton ropy;
- platformy wiertniczej Piper Alfa (1988) — zginęło 167 osób, straty 3,4 miliarda dolarów;
- zbiornikowca Exxon Valdez (1989) — plama ropy na powierzchni 1300 km<sup>2</sup>, zginęły niezliczone ilości ryb, ptaków, fok, morsów i wielorybów;
- wojna w Zatoce Perskiej (1991) — uwolniono, według różnych źródeł, od 800 tys. do 1,5 mln ton ropy naftowej do morza; rozlewy ropy pokryły też 49 km<sup>2</sup> powierzchni lądu a 953 km<sup>2</sup> zostały skażone;
- katastrofa platformy wydobywczej Deepwater Horizon (2010) — 11 pracowników poniosło śmierć, 17 osób zostało rannych, największa katastrofa ekologiczna w historii USA, całkowita ilość wycieku ropy do morza to prawie 5 mln baryłek (czyli ponad 666 tysięcy ton) ropy.

Z analizy powyższych i innych katastrof na morzu wynika, że dotychczasowe wypadki nie uchroniły ludzkości przed popełnianiem często tych samych błędów. Bardzo pouczająca w tym względzie jest także analiza wypadków, które wydarzyły się na akwenie Morza Bałtyckiego [8, 9].

## 2. Obiekt oceanotechniczny w stanie uszkodzonym

Obiekt oceanotechniczny znajduje się w stanie uszkodzonym, jeśli na skutek wystąpienia takich zagrożeń jak kolizja, uderzenie o przeszkodę, wejście na mieliznę, atak terrorystyczny czy inne, nastąpi dostawanie się dużych ilości wody zaburtowej do wnętrza kadłuba obiektu, co spowoduje znaczne obniżenie poziomu bezpieczeństwa obiektu do jego utraty włącznie. Obiekt może znaleźć się w stanie uszkodzonym także wtedy, gdy uszkodzeniu ulega jeden z podstawowych podsystemów obiektu lub gdy doszło na przykład do ataku terrorystycznego, co może prowadzić do dużych zmian w zachowaniu się obiektu [3].

Proces zatapiania przedziału lub danej grupy przedziałów wodoszczelnych, kadłuba obiektu uszkodzonego, dzieli się na etapy i fazy. Wyróżnia się etapy: początkowy, etapy pośrednie i końcowy. Fazy zatapiania związane są ze stopniem wypełnienia zatapianego przedziału wodą zaburtową. Należy zdawać sobie sprawę z faktu, że w czasie zatapiania woda zaburtowa może dostawać się do wnętrza przedziału jaki i wydostawać się z niego. Proces ten zależy od wielu czynników. Na obiekt w stanie uszkodzonym działają różne wymuszenia wewnętrzne i zewnętrzne, najczęściej o charakterze losowym. W stanie uszkodzonym, obiekt powinien zachować zarówno stateczność jak i pływerność. Przy czym za ważniejszą



należy uznać zdolność obiektu do zachowania stateczności. Obie cechy decydują o przebiegu procesu zatapiania przez obiekt na każdym etapie i w każdej fazie zatapiania obiektu.

Powyższe cechy w znacznym stopniu decydują o tym, czy po zakończeniu procesu zatapiania, obiekt uszkodzony może kontynuować misję, czy należy go przeholować do portu (o własnych siłach (obiekt z napędem), na holu), czy też obiekt powinien oczekiwać na pomoc z zewnątrz. Może też dojść do utraty obiektu na skutek utraty stateczności i/lub utraty pływalności [3].

### 3. Metoda oceny bezpieczeństwa obiektu w stanie uszkodzonym

Ocenę bezpieczeństwa obiektów w stanie uszkodzonym można przeprowadzić za pomocą metod prawno-nakazowych (preskrypcyjnych), które oparte są na obowiązujących przepisach lub za pomocą metod, opartych na ocenie zachowania się obiektu i ocenie ryzyka wypadku [3].

Jeśli chodzi o statki, istniejące metody mają charakter preskrypcyjny i oparte są na wymaganiach zawartych w przepisach konwencji (SOLAS, MARPOL). Metody te trudno zastosować do oceny bezpieczeństwa statków w stanie uszkodzonym, przeznaczonych do przewozu produktów ropopochodnych, chemikaliów i gazu. Wynika to między innymi z faktu, że są one ukierunkowane raczej na projektowanie. Niektóre elementy tych metod mają charakter semi-probabilistyczny lub wręcz deterministyczny. Najpoważniejszym mankamentem tych metod jest to, że przy ich zastosowaniu bierze się pod uwagę ograniczoną liczbę scenariuszy wypadku. Właśnie to wyklucza możliwość ich zastosowania do oceny bezpieczeństwa obiektu w stanie uszkodzonym w czasie katastrofy [3, 4].

Jeśli chodzi o morski przemysł wydobywczy, to uczyniono w ostatnich kilku dekadach znacznie większy postęp, jeśli chodzi o zastosowanie metod oceny bezpieczeństwa obiektów oceanotechnicznych opartych na ocenie ryzyka. Zdecydowano się między innymi na zastosowanie do oceny bezpieczeństwa metodyki opartej na Przypadku Bezpieczeństwa (ang. *Safety Case*) — przypadek Piper Alfa. Zdaniem autora, przemysł ten nadal boryka się z brakiem poprawnego modelu/modeli ryzyka wypadku, nieprzetrwania katastrofy [3].

Do oceny bezpieczeństwa obiektów oceanotechnicznych, w tym statków, w stanie uszkodzonym należy zastosować metodę opartą na ocenie zachowania się obiektu i ocenie ryzyka wypadku. Strukturę takiej metody przedstawiono na rysunku 1 [3].

Główną cechą metody jest to, że do oceny bezpieczeństwa obiektu zastosowano tak zwane podejście całościowe, które polega na [3]:

- uwzględnieniu wpływu na bezpieczeństwo obiektu czynników o charakterze projektowym, eksploatacyjnym i tych związanych z zarządzaniem i czynnikiem ludzkim;
- zastosowaniu całościowego modelu ryzyka, który umożliwia wzięcie pod uwagę możliwie wszystkich scenariuszy wypadku.



Do oceny zachowania się obiektu można wykorzystać badania na modelach fizycznych lub symulację komputerową. Ocena zachowania się obiektu uszkodzonego dotyczy oceny jego pływalności, stateczności i zachowania się pod wpływem wymuszeń wewnętrznych (zatapianie, przesunięcie ładunku) i zewnętrznych (oddziaływanie falowania, wiatru). Zachowanie się obiektu uszkodzonego za pomocą symulacji komputerowej można określić rozwiązując układ równań różniczkowych stochastycznych w dziedzinie czasu. Na obecnym etapie badań wykorzystuje się też elementy modeli liniowych, które umożliwiają ocenę zachowania się obiektu w stanie uszkodzonym w oparciu o obliczenia w dziedzinie częstości falowania. Siły hydrodynamiczne działające na kołyszący się obiekt wraz z siłami od działania wody w zatopionym przedziale można wyznaczyć za pomocą hybrydowej metody wyznaczania sił ciśnienia w wodzie. Metoda taka zawiera elementy metody panelowej.



**Rys. 1.** Struktura metody oceny bezpieczeństwa obiektów (statków) w stanie uszkodzonym, opartej na ocenie zachowania się obiektu (statku) i ocenie ryzyka

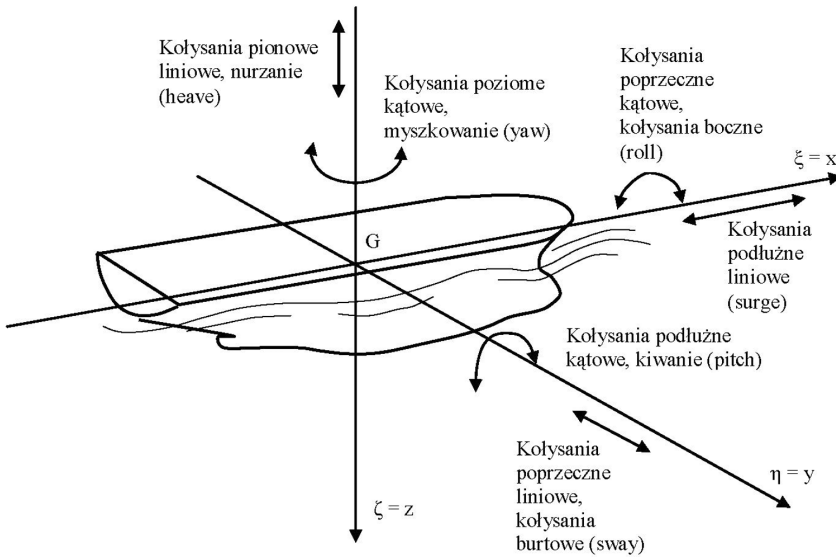
Ocena zachowania się obiektu na wszystkich etapach i we wszystkich fazach zatapiania obiektu, wymaga znajomości przebiegów czasowych kołysań liniowych i kątowych, dla wybranych stopni swobody obiektu przedstawionych na rysunku 2.

W przypadku statku w stanie uszkodzonym taką charakterystyką jest przebieg czasowy kołysań bocznych kątowych statku (roll), który przedstawiono na rysunku 3 [3].

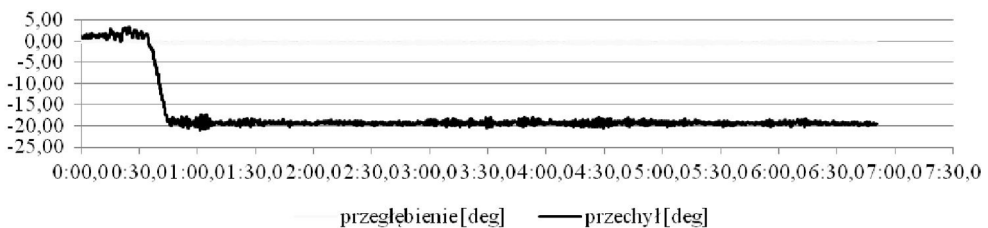
Ocena zachowania się obiektu w stanie uszkodzonym umożliwia opracowanie scenariuszy wypadku w postaci drzew zdarzeń (drzew konsekwencji) ETA. Drzewa zdarzeń ETA umożliwiają oszacowanie ryzyka wypadku dla poszczególnych scenariuszy wypadku [3].



Ocena ryzyka wypadku, które w metodzie nazwano ryzykiem nieprzetrwania katastrofy przez obiekt (statek) polega najpierw na oszacowaniu ryzyka, co przedstawiono w kolejnym rozdziale. Następnie dokonuje się oceny ryzyka (RA, QRA) stosując kryteria akceptacji ryzyka (RAC) w postaci macierzy ryzyka lub koncepcji ALARP. Przy ocenie ryzyka i zarządzając ryzykiem stosuje się tak zwane opcje kontroli ryzyka (RCO) [3, 5, 10].



Rys. 2. Stopnie swobody obiektu (statku) na swobodnej powierzchni wody sfalowanej

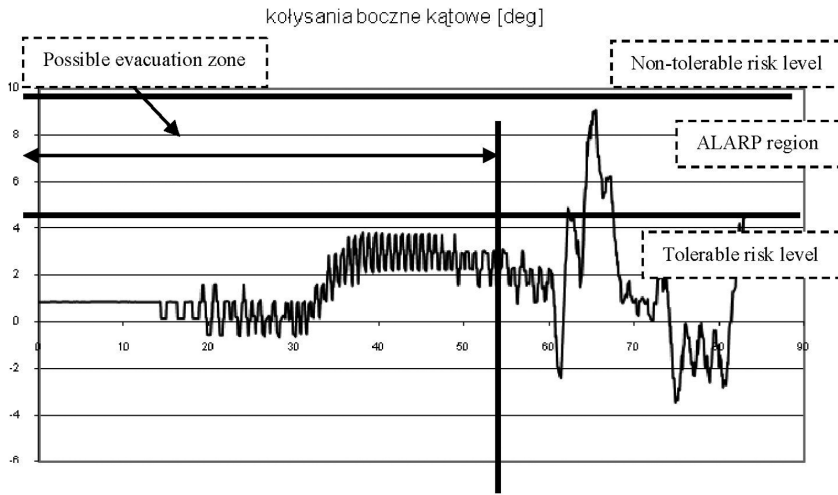


Rys. 3. Przykład przebiegu czasowego kołysań bocznych kątowych statku (roll)

Przykład zastosowania koncepcji ALARP do oceny czasu ewakuacji załogi i pasażerów ze statku, wykorzystując przebieg procesu kołysań bocznych statku w stanie uszkodzonym, przedstawiono na rysunku 4.

Miarą bezpieczeństwa obiektu (statku) w stanie uszkodzonym w proponowanej metodzie jest poziom ryzyka [3].





Rys. 4. Przykład zastosowania koncepcji ALARP do oceny czasu ewakuacji statku w stanie uszkodzonym w oparciu o przebieg kołysań bocznych kątowych statku (roll)

#### 4. Ryzyko nieprzetrwania katastrofy przez obiekt

Ryzyko wypadku w metodzie zostało zdefiniowane jako iloczyn prawdopodobieństwa wystąpienia danego zagrożenia  $P_i$  i konsekwencji wypadku  $C_i$  [3, 7]:

$$R_i = P_i \cdot C_i \quad (1)$$

Z kolei ryzyko nieprzetrwania kolizji przez statek zostało wyznaczone modelując ryzyko w metodzie za pomocą macierzowego modelu ryzyka. Bez względu na metodę zastosowaną do analizy i oceny zachowania się statku w stanie uszkodzonym (badania na modelu fizycznym czy symulacja komputerowa), ryzyko nieprzetrwania kolizji przez obiekt należy obliczyć w sposób następujący [3, 10]:

$$R = P_C \cdot P_{F/C} \cdot PoC \cdot C_C \quad (2)$$

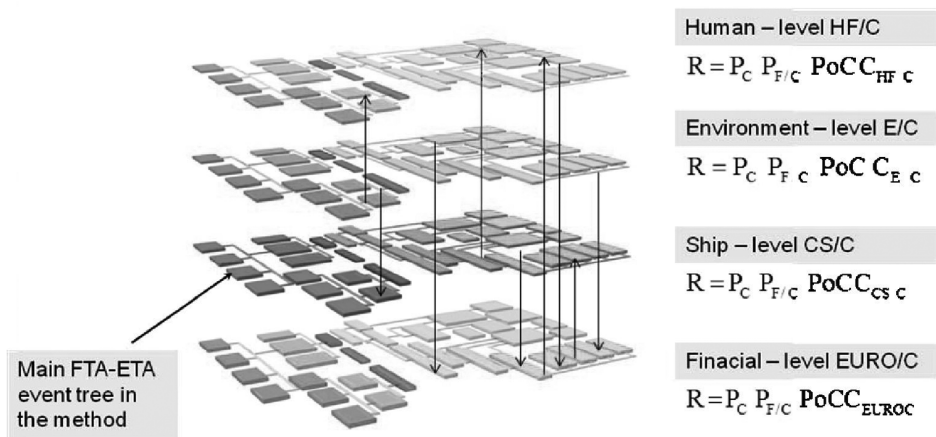
gdzie:

- $P_C$  — prawdopodobieństwo wystąpienia kolizji,
- $P_{F/C}$  — prawdopodobieństwo zatopienia obiektu po wystąpieniu kolizji,
- $PoC$  — prawdopodobieństwo nieprzetrwania katastrofy przez obiekt,
- $C_C$  — konsekwencje katastrofy szacowane na podstawie analizy zachowania się uszkodzonego obiektu.



Obliczając ryzyko nieprzetrwania katastrofy, należy obliczyć prawdopodobieństwa warunkowe, dotyczące zdarzeń inicjujących  $ZI_i$ , zdarzeń głównych  $ZG_j$  (zagrożenia), zdarzeń pośrednich  $ZP_k$  i zdarzeń końcowych  $ZK_l$  (konsekwencje w scenariuszu wypadku). Przy czym prawdopodobieństwa zdarzeń końcowych  $ZK_l$ , rozumiane jako prawdopodobieństwo nieprzetrwania katastrofy przez obiekt (statek), można wyznaczyć za pomocą jednej z czterech metod [3]: zero-jedynkowej; statycznej, opartej o definicję prawdopodobieństwa zupełnego przetrwania kolizji przez statek A metody opartej na ocenie zachowania się statku w stanie uszkodzonym i identyfikacji charakterystyk procesu stochastycznego kołysań bocznych statku w stanie uszkodzonym (metoda własna).

W przypadku, gdy w danym scenariuszu zdarzeń, na etapie zdarzeń pośrednich, występują też zdarzenia dodatkowe  $ZD_j$ , wyznaczenie prawdopodobieństwa warunkowego wystąpienia konsekwencji  $C_i$  (zdarzeń końcowych)  $PoC(C_i)$  znacznie się komplikuje [1, 3]. Stopień komplikacji związanych z oceną ryzyka nieprzetrwania katastrofy przez obiekt, przy uwzględnieniu wpływu czynnika ludzkiego, środowiska i zarządzania (podejście całościowe do bezpieczeństwa), przedstawiono schematycznie na rysunku 5.



**Rys. 5.** Schemat przedstawiający wpływ czynnika ludzkiego, środowiska i zarządzania (podejście całościowe do bezpieczeństwa) na ocenę ryzyka nieprzetrwania katastrofy przez obiekt (statek):  $R = P_C \cdot P_{F/C} \cdot PoC \cdot C_{CS/C}$  [3]

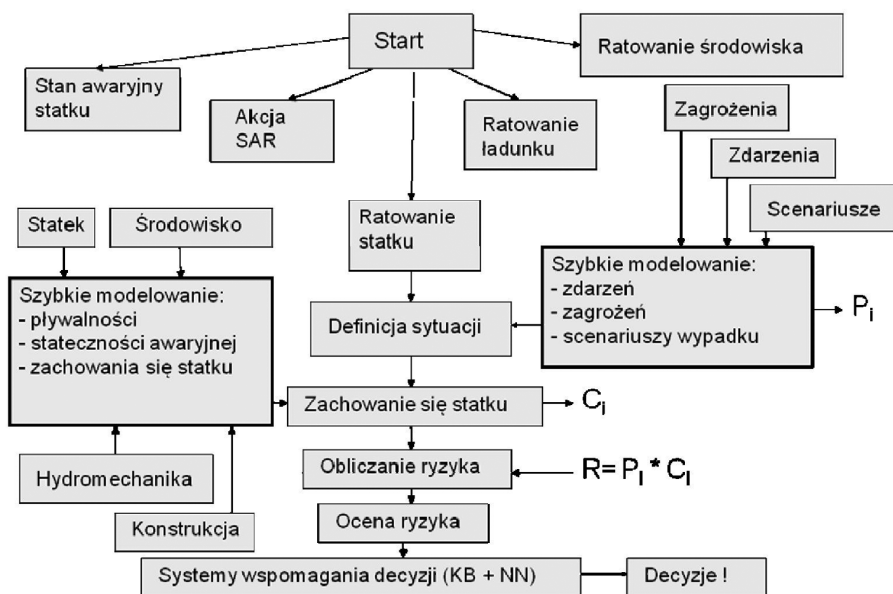
## 5. Procedura zarządzania bezpieczeństwem obiektu

System zarządzania bezpieczeństwem obiektu w stanie uszkodzonym oparty jest na uwzględnieniu wpływu na bezpieczeństwo czynników bezpieczeństwa, ocenie ryzyka wypadku i zarządzaniu ryzykiem [3]. Zarządzanie ryzykiem można zdefiniować jako systematyczny i całościowy proces, który umożliwia ilościową ocenę ryzyka i zarządzaniu nim. Zarządzanie ryzykiem w metodzie polega na ocenie ryzyka (RAC) i zarządzaniu nim, poprzez



monitorowanie i kontrolowanie (RCO, podejmowanie decyzji dotyczących bezpieczeństwa obiektu), w oparciu o zdefiniowany system bezpieczeństwa statku (czynniki bezpieczeństwa) [3]. Z technicznego punktu widzenia, zarządzanie ryzykiem w metodzie jest oparte na strategii redukcji ryzyka, która polega ogólnie na redukcji prawdopodobieństwa wystąpienia danych zdarzeń i redukcji konsekwencji wypadku.

Dynamika sytuacji w czasie katastrofy obiektu na morzu, wymaga szybkiego podejmowania decyzji, dotyczących bezpieczeństwa obiektu, z ukierunkowaniem na bezpieczeństwo ludzi, mienia i środowiska naturalnego. Szybkie podejmowanie decyzji wymaga zastosowania systemu oceny bezpieczeństwa obiektu w stanie uszkodzonym. Schemat takiego systemu przedstawiono na rysunku 6 [3].



Rys. 6. System oceny bezpieczeństwa statku w stanie uszkodzonym w czasie katastrofy

## 6. Wnioski

Obecne prace badawcze związane są z dalszym rozwojem omówionej metody. Rozbudowywany jest całościowy model ryzyka oraz procedura zarządzania ryzykiem wypadku. Zamierzonym efektem badań jest opracowanie modelu obliczeniowego do szybkiej symulacji sytuacji na morzu w czasie katastrofy, który powinien umożliwiać ocenę zachowania się obiektu (statku) w stanie uszkodzonym i ocenę ryzyka na kolejnych etapach katastrofy.

Przedstawione wyniki badań są ściśle związane z poprzednimi pracami autora oraz realizacją projektu badawczego własnego pt.: „Opracowanie modelu do analizy i oceny za-





chowania się statku w czasie katastrofy z wykorzystaniem modelu ryzyka nieprzetrwania kolizji przez statek”, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (decyzja Nr 5703/B/T02/2010/39). Projekt ten jest realizowany na Politechnice Gdańskiej w latach 2010–2012, pod kierunkiem autora.

#### LITERATURA

- [1] *Borysiewicz M., Furtek A., Potemski S.*: Poradnik metod ocen ryzyka związanego z niebezpiecznymi instalacjami procesowymi. Instytut Energii Atomowej, Otwock — Świerk 2000.
- [2] *Faltinsen O.M.*: Sea loads on ships and offshore structures. Cambridge University Press, Cambridge 1990.
- [3] *Gerigk M.*: Kompleksowa metoda oceny bezpieczeństwa statku w stanie uszkodzonym z uwzględnieniem analizy ryzyka. Monografie 101, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2010.
- [4] IMO: Resolution MSC.194(80) Annex 2, Adoption of Amendments to the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, As Amended, adopted on 20.05.2005.
- [5] *Jasionowski A., Vassalos D.*: Conceptualising Risk. Proceedings of the 9th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles STAB 2006, Rio de Janeiro, 25–29 September 2006.
- [6] *Moan T.*: Marine structures for the future. Centre for Offshore Research and Engineering, National University of Singapore, CORE Report No. 2003-01, Singapore 2003.
- [7] *Pillay A., Wang J.*: Technology and Safety of Marine Systems. Elsevier Ocean Engineering Book Series, Volume 7, Elsevier 2003.
- [8] *Romanowski Cz., Witek Piotr.*: Może być strasznie. Budownictwo Okrętowe, nr 3 (548), Marzec 2005, pp. 27–31.
- [9] *Romanowski Cz., Stareńczak P.B.*: Co z tym Bałtykiem? Nasze Morze, nr 12 (24), grudzień 2007.
- [10] *Skjong R., Vanem E., Rusas S., Olufsen O.*: Holistic and Risk Based Approach to Collision Damage Stability of Passenger Ships. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles STAB 2006, Rio de Janeiro, 25-29 September 2006.
- [11] [http://pl.wikipedia.org/wiki/Kategoria:Katastrofy\\_morskie](http://pl.wikipedia.org/wiki/Kategoria:Katastrofy_morskie).