

**ZESZYTY NAUKOWE NR 2 (74)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Lucjan Gućma

**Koncepcja probabilistycznego modelu decyzyjnego
wejścia maksymalnego statku do portu**

Słowa kluczowe: wprowadzanie maksymalnych statków, bezpieczeństwo nawigacji,
model wspomagania decyzji, bezpieczeństwo manewrowania statkiem

Głównym celem artykułu jest przedstawienie koncepcji modelu probabilistycznego wspierania decyzji wejścia dużych statków do portów opartych na teorii ryzyka nawigacyjnego. W modelu wzięto pod uwagę dwa główne typy wypadków, jakie mogą występować na akwenu ograniczonym: wypadek w wyniku przekroczenia bezpiecznego horyzontalnego akwenu manewrowego oraz wypadek w wyniku uderzenia statku o dno spowodowany brakiem zapasu wody pod śródkielką.

**A Concept of a Probabilistic Decision Model
for Maximum Size Ship Entry to a Port**

Key words: maximum ship admittance, safety of navigation, decision support model,
ship manoeuvring safety

The paper presents a concept of probabilistic and risk-based decision support model for large ships admittance to ports. Two main accident types are included into the model: accidents due to ships exceeding horizontal boundaries of manoeuvring area and accidents due to ship hitting the bottom because of failing to maintain the safe under-keel clearance.

Wstęp

Podjęcie decyzji o wejściu maksymalnych statków do portu może być czasami bardzo skomplikowanym i kompleksowym problemem. Z jednej strony możliwe konsekwencje złej decyzji mogą być katastrofalne, z drugiej strony istnieje silny nacisk ze strony operatorów statków na to, żeby pozwolić na takie wejście głównie z powodów ekonomicznych. Decyzja jest zwykle podejmowana przez kapitana portu wspólnie z ekspertami (pilotami morskimi). Normalną praktyką podczas podejmowania decyzji jest przestrzeganie przepisów portowych. Oczywiście, że nie wszystkie możliwe sytuacje mogą być zawarte w przepisach głównie z powodu różnic w wykonaniu danego manewru przez nawigatorów, różnych właściwości manewrowych statków oraz wpływu środowiska na nawigujący statek.

Maksymalne wymiary statków i ekstremalne warunki meteorologiczne podczas wejścia statku do portu są zwykle określane na podstawie analizy ryzyka, opartej na wykonanej wcześniej symulacji komputerowej ruchu statków. Do określenia granicznych rozmiarów statku i ekstremalnych warunków podczas jego wejścia są wykorzystywane probabilistyczne kryteria ryzyka akceptowalnego [4, 5, 6].

Jest oczywiste, że decyzja o wejściu maksymalnych statków jest podejmowana w warunkach wysokiej niepewności, wynikającej z braku wiedzy o warunkach zewnętrznych oraz jakości manewru wykonywanego przez nawigatora. Głównym czynnikiem niepewności jest czynnik związany z człowiekiem (nawigatorem). Ze względu na to, że obecnie brak jest modeli zachowania się człowieka, możliwym rozwiązaniem tego problemu wydaje się być użycie symulatorów ruchu statku po to, aby zidentyfikować oddziaływanie pomiędzy statkiem, człowiekiem i warunkami zewnętrznymi [4].

W prezentowanym modelu decyzyjnym uwzględniono dwa rodzaje wypadków, występujące najczęściej na akwenach ograniczonych:

- wypadki w wyniku przekroczenia przez statek bezpiecznych granic obszaru manewrowego, takie jak: wejście na mieliznę w kanale, kolizja z umocnieniami brzegowymi lub falochronem, kolizja z zacumowanym statkiem lub nabrzeżem, itp.;
- wypadki w wyniku uderzenia kadłubem statku o dno z powodu niedostatecznego zapasu wody pod stępką (przekroczenie dostępnej głębokości).

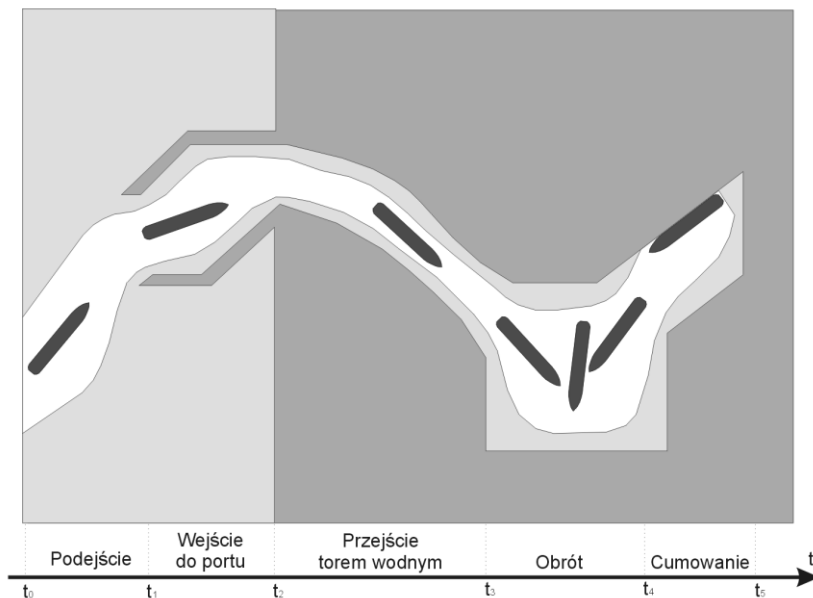
Artykuł przedstawia dwa różne podejścia do budowy probabilistycznego modelu decyzyjnego w zależności od typu wypadku. Metoda zastosowana do pierwszego rodzaju wypadków jest oparta na wcześniej wykonanych seriach symulacyjnych przez nawigatorów. Następnie dane otrzymane z symulacji zos-

tały przetworzone w celu uzyskania ogólnych modeli ryzyka statku na danym akwenie ograniczonym. Aby znaleźć ogólne modele, proponuje się użycie modeli regresji, gdzie niezależnymi parametrami są: rodzaj i parametry rozkładów pozycji statku, a zależnymi wymiary i rodzaj statku oraz warunki meteorologiczne podczas przejścia. Ta grupa wypadków jest spowodowana głównie przez błędy nawigacyjne (błędy ludzkie) oraz techniczne awarie głównych urządzeń znajdujących się na statku. Wejściowe rozkłady dla tych grup wypadków mogą być estymowane za pomocą symulatorów ruchu statków, lub eksperymentów przeprowadzonych z użyciem technik GPS i innych metod z wykorzystaniem danych historycznych o wypadkach.

Inną metodę zastosowano do drugiego typu analizowanych wypadków. Jest ona metodą probabilistyczną, opartą na symulacji Monte Carlo. Wypadki drugiego typu wykazują znaczne ograniczenie wpływu błędu ludzkiego, dlatego też eksperci są wykorzystywani do określenia typów i parametrów niektórych rozkładów używanych do symulacji Monte Carlo. Tego typu wypadki są związane z wieloma czynnikami, takimi jak: błędy sondowania i pogłębiania, błędy określania osiadania i zanurzenia statku, nierówność dna, wpływ pływów i falowania itp. Wszystkie te błędy są dołączane do modelu jako odpowiednie rozkłady i ich parametry.

Istotnym elementem w przedstawianym modelu decyzyjnym jest poziom ryzyka akceptowalnego. Niektóre większe porty mają własne metody określania ryzyka akceptowalnego, z reguły oparte na prawdopodobieństwie wypadków. Podobne podejście zaproponowano w przedstawionym modelu decyzyjnym. Kryterium akceptowalności zostało jednak uzupełnione o czysto ekonomiczny model, gdzie koszt wypadków jest obliczany za pomocą uproszczonego modelu probabilistycznego opartego między innymi na danych historycznych kosztów wypadków w danym rejonie.

Typowy proces przejścia statku przez rejon ograniczony przedstawiono na rysunku 1. Statek porusza się przez system dróg wodnych od morza do nabrzeża. W każdym z etapów statek znajduje się w różnych warunkach nawigacyjnych. Czas przebywania statków w różnych stanach jest zdefiniowany za pomocą rozkładów czasu.



Rys. 1. Proces ruchu statków na akwenu ograniczonym
 Fig. 1. A ship movement process in restricted water area

1. Koncepcja uproszczonego modelu decyzyjnego

Uproszczony model decyzyjny zaprezentowano na rysunku 2. Jako A oznaczono możliwe decyzje (akcje), jako Θ prawdopodobne stany natury, a skutki decyzji jako U . Θ może być interpretowane jako stan natury, wielowymiarowa zmienna losowa, która może w rezultacie powodować wypadek statku. Głównym celem procesu decyzyjnego jest minimalizacja kosztów wypadku i opóźnienia wejścia statków do portów w niekorzystnych warunkach. Ograniczeniem tej funkcji może być minimalny poziom ryzyka akceptowalnego. Spodziewane koszty określonych decyzji, lub bardziej szczegółowo rozkładu tych kosztów mogą być obliczone za pomocą znajomości możliwych skutków wypadków oraz kosztów opóźnień statków. Skutki danych decyzji mogą być wyrażone w miarach ekonomicznych i uznane jako wysoce niedeterministyczne zmienne, co znacznie komplikuje przedstawiany model decyzyjny. Dla przykładu koszty pojedynczej awarii statku składają się z:

- akcji ratunkowej,
- naprawy statku,
- naprawy uszkodzeń ładunku statkowego,
- opóźnienia statku,

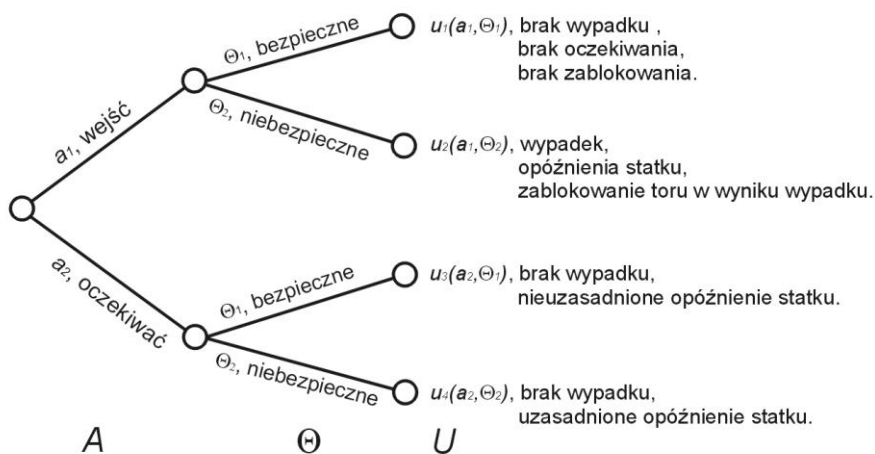
- zamknięcia portu w wyniku wypadków (strata potencjalnych zysków) itp.

Drzewo decyzyjne może być wykorzystywane również do określenia akceptowalnego poziomu wypadków w przypadku, gdy nie ma żadnych zaleceń i uregulowań prawnych w tym zakresie. Jeśli uznamy, że koszt wypadku jest zdeterminowany i wykorzystamy uproszczony model decyzji (rys. 2), to przyjmując kryterium decyzyjne maksymalnej spodziewanej wartości prawdopodobieństwo p_a^* może być określone jako graniczne prawdopodobieństwo, gdzie nie ma różnicy dla podejmującego decyzję pomiędzy decyzjami a_1 i a_2 . Wartość ta może być przedstawiona jako:

$$p_a^* = \frac{1}{\frac{u_1 - u_3}{u_4 - u_2} + 1} \quad (1)$$

gdzie:

$u_1 \dots u_4$ – skutki różnych decyzji przedstawione w wielkościach ekonomicznych.



Rys. 2. Uproszczony model decyzji wejścia statku do portu
 Fig. 2. A simplified decision tree of ship entry to the port

2. Proces ruchu statków na akwenu ograniczonym – pierwszy typ wypadków

Podczas modelowania wypadków polegających na wyjściu statków poza granice bezpiecznego akwenu manewrowego zakłada się, że proces ruchu statku na akwenu ograniczonym jest procesem stochastycznym ze zmieniającym się w czasie prawdopodobieństwem awarii oraz jej skutkami podczas przejścia do miejsca zacumowania.

Do zdefiniowania takiego procesu mogą być wykorzystane trzy metody. Pierwsza z nich jest oparta na teorii łańcuchów Markowa. Przyjmując, że proces ruchu statków na akwenu ograniczonym może być podzielony na wiele etapów- stanów z określonym z góry rozkładem prawdopodobieństwa awarii i czasem przebywania w poszczególnych stanach $F(t)$ (rys. 3) oraz że wypadki są rozłożone losowo podczas przebywania w pojedynczym etapie można założyć, że prawdopodobieństwo wypadku może być opisane rozkładem Poissona ze średnią intensywnością λ_i . Istnieje wiele konsekwentnie występujących po sobie stanów zdadności. Każdy ze stanów może być zmieniony z intensywnością λ_i w stan niezdatności. Zakładając w uproszczeniu, że wszystkie stany niezdatności są sobie równe, tj.: $S_1 = S_2 = \dots = S_i$, czas τ bezawaryjnej pracy statków podczas przejścia statku po akwenu ograniczonym może być zdefiniowany jako [1]:

$$\tau = \sum_{i=1}^n [1 - \tilde{F}_i(\lambda_i)] \prod_{j=1}^{i-1} \tilde{F}_j(\lambda_j) \quad (2)$$

gdzie:

$$\tilde{F}_i(\lambda) = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dF_i(t) - \text{transformata Laplace'a rozkładu przebywania statku w danym stanie,}$$

przy założeniu, że rozkład przebywania statku w i -tym stanie jest zdefiniowany za pomocą rozkładu jednopunktowego, to jest [1]:

$$F_i(t) = \begin{cases} 0 & \text{for } t < L_i \\ 1 & \text{for } t > L_i \end{cases} \quad (3)$$

którego transformata Laplace'a jest równa:

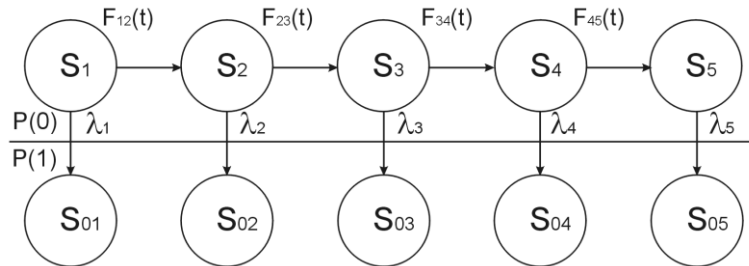
$$\tilde{F}_i(\lambda_i) = e^{-L_i \lambda_i} \quad (4)$$

gdzie:

- L_i – czas przejścia statku przez i -ty stan,
- λ_i – intensywność wypadków podczas stanu i -tego.

Czas niezawodnej pracy statku podczas całego przejścia wynosi:

$$\tau = \sum_{i=1}^n [1 - e^{-L_i \lambda_i}] \prod_{j=1}^{i-1} e^{-L_j \lambda_j} \quad (5)$$



Rys. 3. Proces przejścia statku przez rejon ograniczony
 Fig. 3. The process of ship passage through a restricted area

Inne podejście jest oparte na założeniu, że proces przejścia statku przez rejon ograniczony może być opisany za pomocą niestacjonarnego procesu Poissona ze zmieniającą się w czasie intensywnością awarii. Funkcja rozkładu prawdopodobieństwa takiego procesu może być zapisana jako:

$$f_n(\tau, t_0) = \frac{I^n}{n!} e^{-I} \quad (6)$$

gdzie I jest średnią intensywnością wypadków w czasie od t_0 do τ definiowaną jako:

$$I = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \lambda(t) dt \quad (7)$$

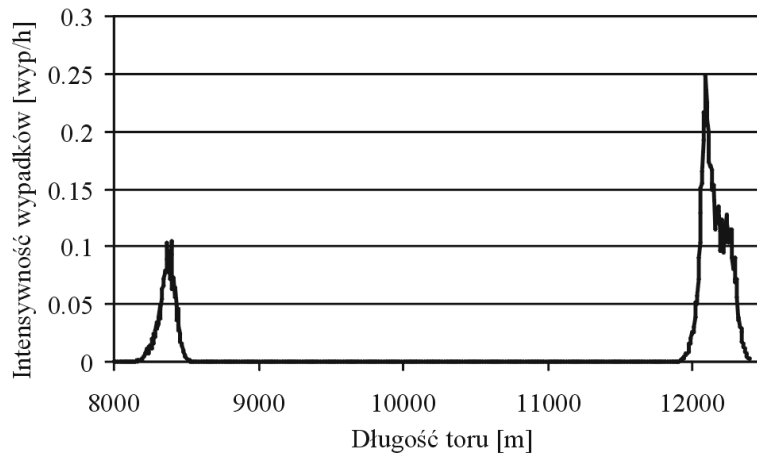
Przykładową funkcję intensywności awarii na torze wodnym określoną za pomocą symulacji komputerowej zamieszczono na rysunku 4. Prezentowane wyniki otrzymano w 45 próbach (przejazdach) symulacyjnych, wykonanych na torze wodnym Szczecin – Świnoujście za pomocą modelu symulacyjnego zbiornikowca do przewozu gazów skroplonych o długości 250 m [3]. W przypadku,

gdy funkcja I jest niedostępna w formie analitycznej, proces ruchu statku może być podzielony na małe odcinki czasowe w przedziałach od t_0 do τ , gdzie proces wypadków może być uznany jako stacjonarny z $\lambda = \text{const}$. Zależność (6) może być zapisana jako:

$$f_n(\tau, t_0) = \prod_{i=1}^k \frac{I_i^n}{n!} e^{-I_i} \quad (8)$$

gdzie:

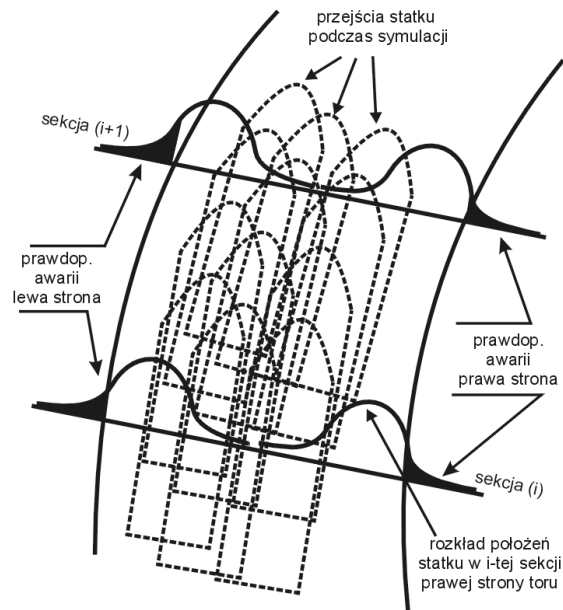
$$I_i = \int_{t_0 + (i-1)\Delta t_i}^{t_0 + i\Delta t_i} \lambda(t) dt = \lambda_i \Delta t_i \quad (9)$$



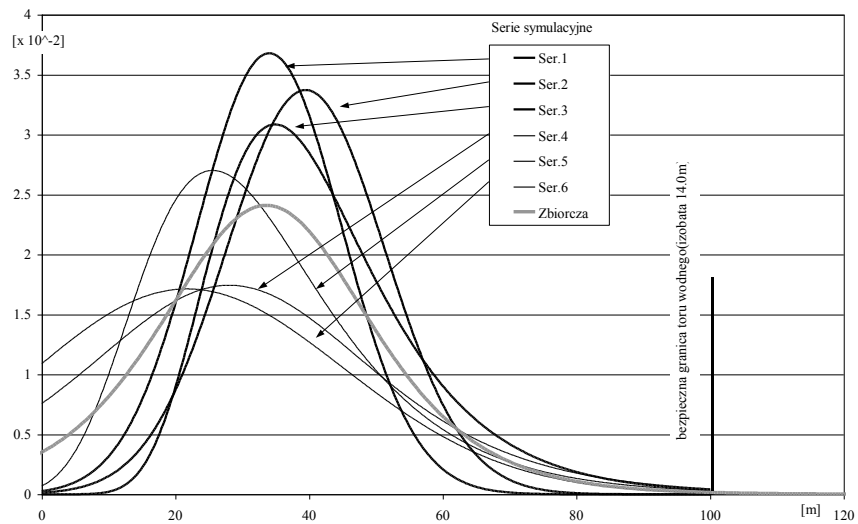
Rys. 4. Intensywność awarii modelu gazowca o długości 250 m w symulowanych przejściach torem wodnym Szczecin – Świnoujście

Fig. 4. Accident intensity of a 250-metre gas carrier in simulated passages through the Szczecin – Swinoujscie fairway

Trzecie alternatywne podejście jest oparte na metodzie Monte Carlo. Po wykonaniu serii przejazdów symulacyjnych w różnych warunkach są określane rozkłady prawdopodobieństw położenia statku w danej sekcji toru wodnego oraz estymuje się ich parametry (rys. 5).



Rys. 5. Rozkład pozycji statku na torze wodnym
 Fig. 5. Distributions of the ship positions on the fairway



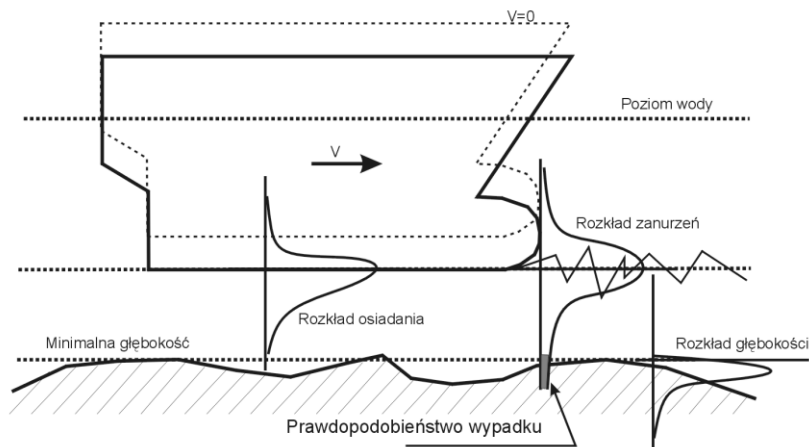
Rys. 6. Rozkłady pozycji modelu masowca o długości 260 m podczas podejścia do portu Świnoujście w różnych warunkach meteorologicznych dla jednej sekcji toru wodnego
 Fig. 6. Position distributions of 260-metre model of bulk carrier approaching the Port of Swinoujście in different environmental conditions (series) for one section of the fairway

Rozkłady te są wykorzystywane jako parametry wejściowe do modelu Monte Carlo [3]. Różne warunki pogodowe mogą być zawarte w modelu za pomocą zmian parametrów rozkładów położenia statku na torze wodnym z wykorzystaniem modeli regresji parametrów (rys. 6).

4. Modelowanie wypadków spowodowanych przekroczeniem dostępnej głębokości

Wypadki spowodowane niedostatecznym zapasem wody pod stępką statku (przekroczenie dostępnej głębokości), których skutkiem jest uderzenie kadłubem statku w dno charakteryzują się znacznym ograniczeniem wpływu czynnika ludzkiego [4]. Eksperti są wykorzystywani w tej metodzie tylko do zdefiniowania typów i parametrów danych rozkładów potrzebnych w symulacji Monte Carlo.

Metoda zastosowana do modelowania tego rodzaju wypadków jest czysto probabilistyczna i oparta na generowaniu liczb pseudolosowych z wielu rozkładów, od których zależy zapas wody pod stępką. Ostatecznie zapas wody pod stępką w formie rozkładu jest określany jako suma wszystkich składowych poszczególnych rezerw (rys. 7). Będzie on zależeć od wielu czynników takich jak: błędy sondowania i pogłębiania, błędy osiadania i określenia głębokości, nierówność dna, wpływ falowania, błędy w określeniu wartości pływu i poziomu wody. Wszystkie te parametry mogą być zawarte w modelu Monte Carlo za pomocą ich rozkładów.



Rys. 7. Określanie prawdopodobieństwa uderzenia statku w dno w wyniku braku zapasu wody pod stępką

Fig. 7. The determination of the probability that the ship hits the ground due to insufficient under-keel clearance

Wnioski

Zaprezentowany model wspomaganie decyzji może być wykorzystany po jego implementacji komputerowej w codziennej praktyce, związanej z problemami bezpieczeństwa statku w portach i na torach wodnych. Model zawiera dwa najistotniejsze rodzaje wypadków występujące na akwenach ograniczonych. W modelu może być również wykorzystana informacja z poprzednich przejść statku podczas jego działania. Takie informacje mogą być użyte do budowy bayesowskiego modelu decyzyjnego.

Literatura

1. Grabski F., Jaźwiński J., *Metody Bayesowskie w niezawodności i diagnostyce*, WKŁ, Warszawa 2001.
2. Gucma L., *The method of average navigation risk assessment with consideration of inequality of ship's accident probability along the waterway*, Risk Analysis II Bologna, Wit Press Southampton Boston, 2000; pp. 125-134.
3. Gucma L., *Navigation risk assessment for vessels manoeuvring in various conditions*, Risk Analysis III, WIT Press Computational Mechanics Publications, Southampton-Boston 2002,
4. Sand, S.E., Nielsen, D.S., Jakobsen, V.B., *Risk Analysis of Simulated Ship Approaches to Ports*, Proc. of the Permanent International Association of Navigation Congresses. Seville 1994.
5. Savenije R.Ph., *Probabilistic Admittance Policy*, PIANC Bulletin No 91. Bruxelles 1996.
6. Wolfe-Barry, J.N., *Risk Analysis Applied to Navigational Aspects of Port Design*, Proc. of the Permanent International Association of Navigation Congresses. Seville 1994.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

dr inż. kpt.ż.w. Zbigniew Burciu, prof. AM
dr hab. inż. Wiesław Galor, prof. AM

Adres Autora

dr inż. st.of.pokł. Lucjan Gucma
Akademia Morska w Szczecinie
Instytut Inżynierii Ruchu Morskiego
ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin