

Andrzej BAŁK¹

BUDOWA MODELU SYTUACJI KOLIZYJNEJ STATKÓW NA AKWENIE OGRANICZONYM

Artykuł przedstawia proces konstruowania modelu sytuacji kolizyjnej na akwencie ograniczonym. Do osiągnięcia postawionego celu badań wykorzystano sieci bayesowskie. Wykorzystano metody oceny ryzyka kolizji oraz estymacji skutków za pomocą obliczenia spodziewanej energii zderzenia. Przeprowadzone badania symulacyjno – eksperckie potwierdziły wysoką poprawność oceny sytuacji kolizyjnej.

CONSTRUCTION OF SHIPS' COLLISION SITUATION MODEL IN RESTRICTED AREA

The article presents the construction of ships' collision model in restricted area. With this end in view the bayesian networks were utilized. Also risk collision estimation methods were used. In order to estimate the collision results, the expected crash energy was calculated. The research carried out confirmed high accuracy of proposed ships' collision situation model.

1. WSTĘP

Ruch statku po torze wodnym, który może być rozpatrywany jako system techniczny niesie ze sobą zagrożenie, i to zarówno dla otoczenia jak i statku. Zagrożenie to charakteryzują się niepewnością dotyczącą jego wystąpienia jak i skutków jakie może wywołać. Niepewność można wyrazić jako prawdopodobieństwo zaistnienia danego zdarzenia, co w powiązaniu z ewentualnymi skutkami, pozwala na wyznaczenie ryzyka. Kaplan i Garrick (1981) definiują ryzyko jako zbiór elementów r_i , każdy o innym prawdopodobieństwie p_i i skutkach s_i ewentualnego zajścia zdarzenia.

Aktualnym problemem bezpieczeństwa żeglugi jest zdolność szacowania ryzyka na akwencie ograniczonym (Gucma S. 2000, Gućma L. & Pietrzykowski 2001, 2002, Otte 1998, De Rouck 1998). W inżynierii ruchu morskiego przyjmuje się ryzyko jako możliwość powstania strat w określonym przedziale czasu i wyraża się je jako sumę iloczynów prawdopodobieństwa i skutków wystąpienia danego zdarzenia (Fullwood 1977):

¹ Akademia Morska Szczecin, Wydział Nawigacyjny; 70-500 Szczecin; ul. Wały Chrobrego 1/2
Tel: + 48 91 48-09-435, E-mail: a.bak@am.szczecin.pl

$$R = \sum_{i=1}^n P_i S_i \quad (1)$$

gdzie:

P_i – prawdopodobieństwo wystąpienia awarii i-tego typu w jednostce czasu,

S_i – skutki awarii i-tego typu w jednostce czasu,

n – całkowita liczba awarii różnych typów.

Gucma S. (2000) uzupełnia definicję ryzyka o częstotliwość względną wykonywania badanego manewru. Wówczas ryzyko przedstawia się wzorem:

$$R = I_R * P_A * S \quad (2)$$

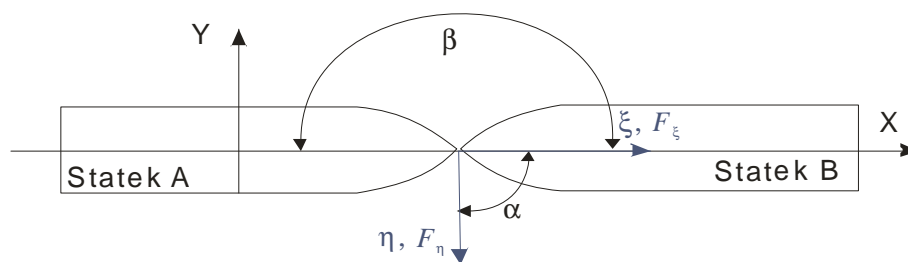
gdzie:

I_R – średnia roczna intensywność (częstość) wykonywania danego manewru,

P_A – prawdopodobieństwo wystąpienia określonej awarii,

S – skutki, jakie spowoduje awaria.

W prowadzonych badaniach założono, iż czynnikiem niebezpiecznym (zagrożeniem) jest kolizja statków. Prawdopodobieństwo wystąpienia tego zdarzenia jest szacowane za pomocą zdefiniowanej wcześniej sieci bayesowskiej. Jako konsekwencje przyjęto energię kinetyczną zderzenia obu statków, która w momencie zetknięcia się kadłubów zamieniana jest na pracę zderzenia, powodującą plastyczne lub sprężyste odkształcenie kadłubów. Wartość energii kinetycznej zderzenia, a co za tym idzie wykonanej pracy, decyduje o rodzaju odkształcenia. Skutki kolizji są określone jako iloraz energii kinetycznej zderzenia statków w danej sytuacji oraz maksymalnej energii zderzenia jaka może wystąpić dla danych statków przy aktualnej prędkości. Przy wyznaczaniu maksymalnej energii kinetycznej zderzenia brane są pod uwagę masy obu statków, ich aktualne prędkości oraz wzajemne położenie w momencie kolizji, które dla maksymalnej energii zderzenia odpowiada konfiguracji statków dziób w dziób (Rys. 1) – Zhang 1999.



Rys. 1. Kolizja statków "dziób w dziób".

Skutki wyrażają się wzorem:

$$S = \frac{E}{E_{\max}} \quad (3)$$

gdzie:

- S – skutki kolizji,
- E – energia zderzenia w danej sytuacji,
- E_{max} – maksymalna energia zderzenia pomiędzy dwoma statkami.

Równocześnie, aby możliwym było wyznaczenie ryzyka kolizji w wartościach od 0 do 1, tak jak jest to przyjęte w literaturze, aktualną energię zderzenia odniesiono do maksymalnej energii zderzenia pomiędzy dwoma statkami, która jest wyznaczana w początkowej fazie obliczeń jako wartość stała dla dwóch konkretnych statków w założonych warunkach żeglugi. Podsumowując, ryzyko kolizji będzie wyznaczane ze wzoru:

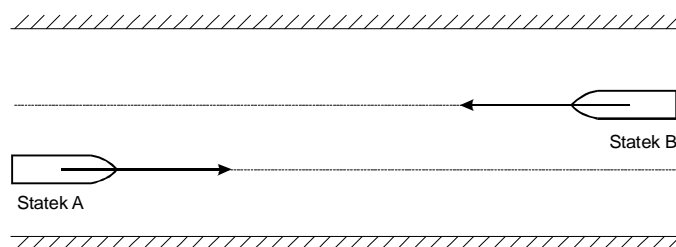
$$R_k = P \times S \quad (4)$$

gdzie:

- R_k – ryzyko kolizji,
- P – prawdopodobieństwo wystąpienia kolizji,
- S – skutki kolizji,

2. OCENA RYZYKA KOLIZJI

Analizując trajektorie ruchu statków na torze wodnym można zauważyć, iż w większości przypadków nie jest możliwe wyznaczenie energii zderzenia. Ma to miejsce wówczas, gdy statki podążają kursami nieprzecinającymi się (Rys. 2). Jednakże nawet wtedy ryzyka kolizji nie można uznać za równe zero, gdyż każdy z rozpatrywanych statków może wykonać taki manewr, który w efekcie doprowadzi do wystąpienia kolizji.



Rys. 2. Bezkolizyjne wymijanie się dwóch statków na torze wodnym.

Ze względu na dużą liczbę potencjalnych manewrów, jakie statek może wykonać w trakcie żeglugi, wyróżniono tylko przypadki najbardziej prawdopodobne, jakie mogą mieć miejsce na torze wodnym. Biorąc pod uwagę manewry wymijania się statków, przepisy MPDM oraz tzw. dobrą praktyka morską ograniczona możliwość dowolnej zmiany parametrów ruchu jednostki takich jak kurs oraz prędkość. Rozpatrywano jedynie najbardziej prawdopodobne manewry, jakie wykonuje statek w warunkach żeglugi torem wodnym bez rozpatrywania przypadków awaryjnych. Należą do nich:

- manewr zmiany kursu w prawo o 5° z krokiem co 1° ,
- manewr zmiany kursu w lewo o 5° z krokiem co 1° ,

Dla wszystkich możliwych kombinacji manewrów zmiany kursu każdego statku wyliczany jest iloczyn wagi manewru w_i oraz energii zderzenia E_i . Biorąc powyższe pod uwagę ryzyko kolizji obliczono według następującego wzoru:

$$R_k = P \frac{\sum_{i=1}^n (w_i \times E_i)}{n \times E_{\max}} \quad (5)$$

gdzie,

- R_k – ryzyko kolizji,
- P – prawdopodobieństwo wystąpienia kolizji,
- w_i – waga i-tego manewru,
- E_i – energia zderzenia dla i-tego manewru,
- E_{\max} – maksymalna energia zderzenia pomiędzy dwoma statkami,
- n – ilość rozpatrywanych manewrów.

Zaproponowano następujący algorytm obliczania ryzyka kolizji:

1. Wyznaczenie prawdopodobieństwa kolizji dla obecnej sytuacji nawigacyjnej.
2. Obliczenie energii zderzenia dla obecnej sytuacji nawigacyjnej.
3. Obliczenie maksymalnej możliwej energii zderzenia jaka może wystąpić podczas zderzenia się dwóch statków – E_{\max} .
4. Obliczenie odpowiednich wag proponowanym manewrom na torze wodnym.
5. Wyznaczenie energii zderzenia dla wszystkich założonych, hipotetycznych zmian kursu obydwu statków ($n = 11^2 = 121$).
6. Obliczenie ryzyka kolizji dla wszystkich z wymienionych wyżej przypadków.

3. OKREŚLANIE ENERGII ZDERZENIA STATKÓW NA AKWENIE OGRANICZONYM

W celu przeprowadzenia analizy ryzyka kolizji statków obliczono ewentualną energię zderzenia w przypadku wystąpienia kolizji pomiędzy dwoma statkami w konkretnej sytuacji nawigacyjnej. Oparto się na metodzie opracowanej przez S.Zhang'a (1999) i opublikowanej jako część pracy doktorskiej, promowanej przez profesora P.T.Pedersena. Metoda ta pozwala na wyliczenie energii zderzenia statków poruszających się po akwenu, gdzie nie występuje oddziaływanie prądu i wiatru na statek. Zaletą tej metody jest możliwość detekcji przypadków, w których oba statki ślizgają się wzdłuż swoich burt jak i przypadków, gdy prędkość względna statków po zderzeniu jest równa zero.

3.1. Określanie energii zderzenia

W celu wyznaczenia energii zderzenia koniecznym jest znajomość prędkości względnej $\dot{\eta}(T)$ w przypadku, gdy statki poruszają się względem siebie po kolizji (np. otarcie się burtami). Prędkość tę można obliczyć ze wzoru:

$$\dot{\eta}(T) = \dot{\eta}(0) - \frac{K_{\xi} + \mu_0 K_{\eta}}{D_{\xi} + \mu_0 D_{\eta}} \dot{\xi}(0)(1+e) \quad (6)$$

gdzie,

μ_0 – współczynnik tarcia

Należy wyróżnić dwa przypadki, dla których energia zderzenia powinna być wyznaczona:

1. Przypadek 1 występuje, gdy prędkość względna statków po kolizji jest równa zero – statki zostają zablokowane jeden z drugim.
2. Przypadek 2 występuje, gdy prędkość po kolizji jest różna od zera. Ma to miejsce wówczas, gdy zderzenie się dwóch statków nie powoduje całkowitego pochłonięcia energii kinetycznej ruchu statków.

Przypadek 1 – prędkość względna po kolizji równa zero.

Energia E_{ξ} wyzwolona na skutek kolizji w kierunku ξ może być przedstawiona jako:

$$E_{\xi} = \int_0^{\xi_{\max}} F_{\xi} d\xi = \frac{1}{2} \frac{1}{D_{\xi} + \mu D_{\eta}} \dot{\xi}(0)^2 \quad (7)$$

Natomiast energia E_{η} wyzwolona w kierunku η może być wyrażona następującym wzorem:

$$E_{\eta} = \int_0^{\eta_{\max}} F_{\eta} d\eta = \frac{1}{2} \frac{1}{\frac{1}{\mu} K_{\xi} + K_{\eta}} \dot{\eta}(0)^2 \quad (8)$$

gdzie,

ξ_{\max} – odkształcenie kadłuba w kierunku ξ po kolizji,

η_{\max} – odkształcenie kadłuba w kierunku η po kolizji.

Całkowita wyzwolona energia podczas zderzenia będzie stanowić sumę powyższych składowych w kierunkach ξ oraz η :

$$E_{total} = E_{\xi} + E_{\eta} \quad (9)$$

Przypadek 2 – prędkość względna po kolizji różna od zera.

W tym przypadku, energie wyzwolone w trakcie zderzenia mogą być wyrażone następująco:

$$E_{\xi} = \int_0^{\xi_{\max}} F_{\xi} d\xi = \frac{1}{2} \frac{1}{D_{\xi} + \mu_0 D_{\eta}} \dot{\xi}(0)^2 (1-e^2) \quad (10)$$

$$E_{\eta} = \int_0^{\eta_{\max}} F_{\eta} d\eta = \frac{1}{2} \frac{1}{\frac{1}{\mu_0} K_{\xi} + K_{\eta}} (\dot{\eta}(0)^2 - \dot{\eta}(T)^2) \quad (11)$$

4. WERYFIKACJA MODELU SYTUACJI KOLIZYJNEJ

Weryfikację opracowanego modelu sytuacji kolizyjnej przeprowadzono w oparciu o zbudowany system oceny sytuacji nawigacyjnej, w którym zaimplementowano wymieniony model. Budowany model matematyczny sytuacji kolizyjnej służy do automatycznego wykrywania potencjalnie niebezpiecznych sytuacji kolizyjnych podając prawdopodobieństwo kolizji oraz wyestymowane ryzyko kolizji jako iloczyn prawdopodobieństwa i skutków kolizji. Do określania skutków kolizji stosowane są metody deterministyczne, natomiast do oceny prawdopodobieństwa kolizji metody probabilistyczne. Weryfikację modelu przeprowadzono porównując wyniki badań modelowych z wynikami rzeczywistymi. Do weryfikacji zbudowanego systemu opracowano specjalną metodę symulacyjno – ekspertową. Polega ona na wykonaniu szeregu prób symulacyjnych manewrów wymijania się statków i poddania ich ocenie ekspertów. Jednocześnie te same próby symulacyjne oceniane są przez model sytuacji kolizyjnej. Tak otrzymane wyniki porównano pod kątem zgodności ocen, ich tendencji zmian oraz wzajemnych korelacji.

Obiektem badań były manewry mijania się statków na torze wodnym Szczecin – Świnoujście wraz z oceną sytuacji nawigacyjnej przez ekspertów. Oceniali oni, podobnie jak przy definiowaniu sieci, prawdopodobieństwo kolizji statków. Celem właściwej weryfikacji systemu oceny sytuacji nawigacyjnej, do badań wybrano inną grupę ekspertów niż ta, która uczestniczyła w badaniach służących do definiowaniu sieci bayesowskiej.

Weryfikację systemu oceny sytuacji nawigacyjnej przeprowadzono poprzez:

1. Wykonanie badań symulacyjnych na torze Szczecin – Świnoujście.
2. Ocenę sytuacji przez oficerów i kapitanów.
3. Porównanie uzyskanych ocen z ocenami systemu.

4.1. Badania symulacyjne

Jako obszar badań wybrano odcinek toru wodnego Szczecin – Świnoujście leżący na wysokości wysp Karw Wielki oraz Długi Ostrów po ich wschodniej stronie. Jest to odcinek rzeki Odry o średniej szerokości ok. 370 m, na którym jest zlokalizowane kotwicowisko ograniczające dostępną szerokość toru wodnego. W najwyższym miejscu odległość między krawędzią toru a granicą kotwicowiska wynosi 140 m. Biorąc pod uwagę zanurzenie statku wynoszące $T = 6,35\text{m}$ oraz przyjmując bezpieczną izobatę za równą 7m szerokość dostępnego toru wodnego wynosi około 110m.

W badaniach wykorzystano te same statki, dla których zdefiniowano sieć bayesowską. Pozycje początkowe statków to punkty na osi toru wodnego odpowiednio na wysokości wschodniego cypla wyspy Długi Ostrów oraz północnego cypla wyspy Wielki Karw. Statki poruszały się ze stałą nastawą prędkości WN, co odpowiadało prędkości około 6 węzłów. Wykonano 15 prób bezpiecznego mijania się statków. Próby były rejestrowane do

momentu minięcia się ruf obu statków. Manewry prowadzące do uniknięcia kolizji polegały jedynie na zmianie kursu i były podejmowane w różnych odległościach między statkami (Tab. 1). Podana w tabeli odległość rozpoczęcia manewru dotyczy momentu zmiany kursu przez dowolny z dwóch mijających się statków. Wykonano w sumie 15 prób symulacyjnych wymijania się statków na torze wodnym Szczecin – Świnoujście (po trzy próby dla każdego wariantu wymienionego w Tab. 1).

Tab. 1. Odległości między statkami w momencie rozpoczęcia manewrów zmiany kursu.

Wariant	Ilość prób	Odległość rozpoczęcia manewru	średnie TCPA
I	3	2 L _{pp}	57 s
II	3	3 L _{pp}	85 s
III	3	4 L _{pp}	120 s
IV	3	5 L _{pp}	145 s
V	3	6 L _{pp}	175 s

4.2. Analiza uzyskanych wyników

Zbudowany model sytuacji kolizyjnej statku charakteryzuje się wysokim stopniem poprawności oceny sytuacji nawigacyjnej (ok. 85%). Ponadto wraz z oceną podawane jest prawdopodobieństwo poprawności samej oceny. Zauważono, iż oceny błędne charakteryzują się niską wartością wspomnianego prawdopodobieństwa, co pozwala na odrzucenie tych ocen zwiększając jednocześnie wiarygodność systemu.

Wykorzystanie opracowanego modelu na innych statkach możliwe jest po ponownym opracowaniu bazy wiedzy dla nowego statku, uwzględniającej jego charakterystyki manewrowe przy różnych stanach załadowania.

W prezentowanym modelu wszystkie obliczenia odbywały się *post factum*, jednakże praca modelu w czasie rzeczywistym jest możliwa, gdyż obliczenia przeprowadzane przez sieć bayesowską trwały ułamki sekund. Wykorzystanie tego algorytmu w rzeczywistym systemie skutkowałoby równie krótkimi czasami.

Analizując wyniki z przeprowadzonych prób symulacyjnych stwierdzono wysoką korelację ocen badaczy oraz ocen estymowanych przez sieć bayesowską. Wyniki przedstawia

Tab. 2.

Tab. 2. Korelacje ocen badaczy (P) i ocen sieci bayesowskiej (\$P) w poszczególnych próbach symulacyjnych na torze wodnym Szczecin - Świnoujście.

	Próba 01Sz	Próba 02Sz	Próba 03Sz	Próba 04Sz	Próba 05Sz	Próba 06Sz	Próba 07Sz	Próba 08Sz
	P	P	P	P	P	P	P	P
\$P	0.86	0.74	0.60	0.72	0.76	0.85	0.93	0.94
	Próba 09Sz	Próba 10Sz	Próba 11Sz	Próba 12Sz	Próba 13Sz	Próba 14Sz	Próba 15Sz	
	P	P	P	P	P	P	P	
\$P	0.88	0.92	0.84	0.86	0.79	0.88	0.91	

W 14 spośród 15 przeprowadzonych prób symulacyjnych współczynnik korelacji jest wysoki (od 0,72 do 0,94) co jest bardzo dobrym wynikiem stanowiącym dowód, iż ocena sytuacji kolizyjnej przeprowadzana przez system jest prawidłowa. Wyniki te świadczą również o poprawnym zdefiniowaniu sieci bayesowskiej będącej głównym elementem systemu oceny sytuacji kolizyjnej. Jedynie w jednym przypadku, w próbie 03Sz, korelacja ocen wynosi 0,60. W próbie tej oceny sieci są bardziej zachowawcze niż oceny badaczy, gdy odległości między statkami są duże (od 1300 do 3300 metrów). Badacze przy tak dużych odległościach nie oceniają sytuacji nawigacyjnej jako bardzo niebezpiecznej co jest związane z ich doświadczeniem. W pozostałych przypadkach uznano, że wyniki oceny sieci są na wystarczająco wysokim poziomie.

5. WNIOSKI

Budując system oceny sytuacji nawigacyjnej postawiono przed nim następujące wymagania, które zawarto w czterech punktach:

1. System powinien poprawnie wnioskować na podstawie danych takich jak parametry ruchu jednostki, warunki środowiska oraz akcje podejmowane przez nawigatora.
2. System powinien być wiarygodny tj. oceniać sytuację prawidłowo, a w przypadku popełnienia pomyłki, powinien ją skorygować.
3. Przystosowanie systemu do pracy na różnych statkach powinno polegać jedynie na wymianie bazy wiedzy bez konieczności modyfikacji pozostałych modułów systemu.
4. Wnioskowanie powinno odbywać się w czasie rzeczywistym.

Zgodnie z założeniami, budowany matematyczny model sytuacji kolizyjnej służy jako narzędzie wspierające proces nawigacyjny oraz przyczynia się do poprawy bezpieczeństwa żeglugi. Jednym z głównych założeń budowanego modelu było systematyczne przeprowadzanie operacji wnioskowania na podstawie danych z urządzeń statkowych takich jak odbiorniki GPS, DGPS, Glonass, AIS, oraz z urządzeń: żyrokompas, ster, silnik główny jak też urządzeń pozwalających na monitorowanie warunków zewnętrznych (wiatromierz, termometr i inne).

Właściwa ocena sytuacji nawigacyjnej jest jednym z najważniejszych czynników bezpiecznej nawigacji na akwenu ograniczonym. Wpływa ona bezpośrednio na podejmowane decyzje przez nawigatora. Niejednokrotnie podjęcie decyzji jest utrudnione ze względu na zbyt małą lub zbyt dużą ilość dostępnych informacji.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono:

1. Możliwa jest automatyczna identyfikacja sytuacji nawigacyjnej na akwenu ograniczonym.
2. Obliczanie ryzyka kolizji jako iloczynu prawdopodobieństwa kolizji i skutków pozwala wyznaczyć te przypadki, w których przy założonych dopuszczalnych manewrach statku nie dojdzie do kolizji.
3. W celu filtracji ocen prawdopodobieństwa wystąpienia kolizji celowym jest korzystanie z uśrednionej krzywej ocen. Dane surowe zawierają niepożądane informacje zakłócające.

Stwierdzono konieczność prowadzenia dalszych badań w tym kierunku. Miałyby one na celu uwzględnienie innych nie zawartych w niniejszej pracy uwarunkowań zewnętrznych

mających wpływ na identyfikację i ocenę sytuacji nawigacyjnej na akwenie ograniczonym. Można do nich zaliczyć:

- różne statki,
- różne stany załadowania statku,
- warunki hydrometeorologiczne,
- widzialność i pora dnia.

Badanie te posłużyłyby jako wskazanie innych czynników i stopnia ich wpływu na ocenę sytuacji nawigacyjnej, a w efekcie na bezpieczeństwo żeglugi.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Fullwood R.R.: *Risk as consequence expectation value from linear superposition*, Nuclear Safety Vol.18, 1977.
- [2] Gucma S.: *Model of vessel's manoeuvring in limited sea areas in navigational risk aspect*. Archives of Transport Polish Academy of Sciences, vol. 2, issue 1, Warszawa 2000.
- [3] Gucma L., Pietrzykowski Z.: *Application of the probabilistic-fuzzy method of assessing the risk of a ship manoeuvre in a restricted area*. W: Marine Technology IV, Editors: C.A. Brebbia, WIT Press Computational Mechanics Publications, Southampton-Boston; pp. 41-51, 2001.
- [4] Gucma L., Pietrzykowski Z.: *Theoretical foundations of the probabilistic-fuzzy method for assessment of dangerous situation of a ship manoeuvring in a restricted area*. Annual of Navigation Polish Academy of Sciences (PAN), No. 3, pp.111-125 Gdynia 2001.
- [5] Gucma L., Pietrzykowski Z.: *Application of probabilistic –fuzzy method of a dangerous situation of a ship manoeuvring in a restricted area. Part 2*. Annual of Navigation PAN, Vol. 4. Gdynia 2002.
- [6] Kaplan S., Garrick B.J.: *On the quantitative definition of risk*, Risk Analysis, 1(1), p.11-27, 1981.
- [7] Otte B.: *Risk assessment of the crossing of the Westhinder shipping lane by the Nor Fra gas pipeline*. 29th PIANC Navigation Congress, Den Haag 6 – 11 September 1998.
- [8] De Rouck,: *Risk assessment of the Western sealock in Tereneuzen*. 29th PIANC Navigation Congress, Den Haag 6 – 11 September 1998.
- [9] Zhang S.: *The Mechanics of Ship Collisions*. Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark 1999.