

Piotr LIZAKOWSKI

HYDRODYNAMICZNE INTERAKCJE MIĘDZY STATKAMI PODCZAS MANEWRU WYPRZEDZANIA

Streszczenie

Bezpieczeństwo manewrów wyprzedzania statków morskich jest istotnym elementem podczas realizacji nawigacji na akwenach ograniczonych. Specyfika akwenu ograniczonego redukuje dostępną przestrzeń manewrową, zwiększając ryzyko przerwania elementu systemu logistycznego poprzez kolizję statków podczas manewru wyprzedzania. Jednym z czynników determinujących bezkolizyjne wykonanie manewru jest prawidłowa ocena odległości bocznej pomiędzy jednostkami w momencie realizacji tego manewru. W artykule przedstawiono przyczyny kolizji statków podczas wyprzedzania na akwenach o ograniczonej przestrzeni manewrowej.

WSTĘP

Prowadzenie żeglugi na morzu związane jest z ryzykiem, które jest kształtowane w zależności od rejonu pływania, parametrów statku, osób prowadzących daną jednostkę oraz warunków hydrometeorologicznych. Nawigacja to prowadzenie statku z uwzględnieniem warunków zewnętrznych, określaniem jego położenia, w celu bezpiecznego przeprowadzenia zgodnego z zadaniem transportowym. Do warunków zewnętrznych będziemy zaliczać charakterystykę batymetryczną akwenu wodnego wraz z jego warunkami hydrometeorologicznymi oraz wielkość natężenia ruchu statków. Środowisko, w którym poruszają się statki morskie jest otoczeniem specyficznym, stwarzającym szereg nieprzewidzianych sytuacji. Stały wzrost natężenia ruchu statków ich wielkości powoduje obniżenie bezpieczeństwa w transporcie morskim.

Personel nawigacyjny statków morskich musi realizować nawigację, czyli bezpiecznie przeprowadzić statek z portu wyjścia do portu docelowego, w warunkach, w których prawdopodobieństwo zderzenia z innym obiektem jest wysokie [2, 3]. Konsekwencje takiego zdarzenia obejmują zarówno utratę środków transportu, zagrożenie życia ludzkiego (załoga oraz pasażerowie) i zanieczyszczenie środowiska. Kolizje statków na morzu będą się zdarzały zawsze, szczególnie często w obszarach ograniczonych i trudnych warunkach pogodowych, w których nawigator pod wpływem stresu, jest narażony na podjęcie niewłaściwej decyzji w celu uniknięcia zderzenia w trakcie manewru wyprzedzania. Wyposażanie statków w systemy wykrywania obiektów, wzajemnych środków łączności jest standardem. Jednak systemy te nie zawierają elementu doradczego, pozwalającego na wypracowanie i wskazanie prawidłowej decyzji jaką należy podjąć celem uniknięcia kolizji. Przepisy regulujące wzajemny ruch i obowiązki statków na morzach są nieprecyzyjne w odniesieniu do

specyficznych obszarów, jakimi są akweny ograniczone, dlatego też wyznaczenie bezpiecznych parametrów manewrów wyprzedzania statków morskich jest konieczne.

1. AKWENY O OGRANICZONEJ PRZESTRZENI MANEWROWEJ

Prowadzenie bezpiecznej nawigacji jest uzależnione w bardzo dużym stopniu od rodzaju akwenu, na którym się ona odbywa. Istnieją dwa rodzaje klasyfikacji akwenów manewrowych: ogólne i szczegółowe [2]. Klasyfikacje ogólne dzielą akweny nawigacyjne na ograniczone i nieograniczone, natomiast szczegółowe na konkretne ich typy, jak na przykład: oceany, morza, akweny przybrzeżne, porty, akweny portowe, cieśniny, kanały, rzeki.

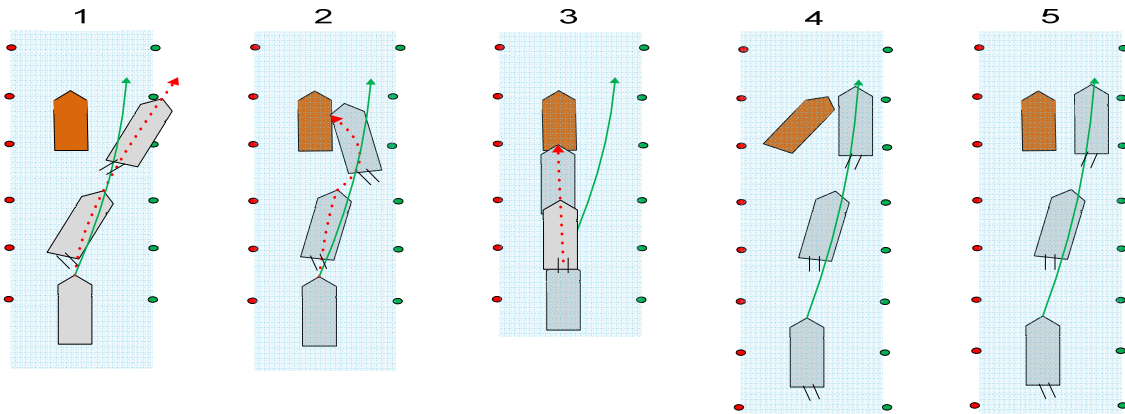
Akweny otwarte charakteryzują się brakiem stałych przeszkód nawigacyjnych. Zatem prowadzenie nawigacji podczas pełnienia wachty morskiej sprowadza się przede wszystkim do unikania kolizji z innymi statkami, mając do dyspozycji nieograniczoną przestrzeń manewrową. Definiując akwen ograniczony można oprzeć się na różnicach, jakie dzielą go od akwenu otwartego. Jako dwa główne czynniki różniące te dwa rodzaje akwenów nawigacyjnych można uznać za dominujące: trudność wykonania manewru oraz bezpieczeństwo wykonania manewru.

Oba te czynniki są ze sobą powiązane i wraz ze wzrostem trudności wykonania manewru maleje z reguły stopień jego bezpieczeństwa. Ze względu na trudność wykonania manewru, statek na akwenach ograniczonych prowadzony jest przez nawigatora mającego duże doświadczenie. Można zatem sklasyfikować akwen ograniczony jako akwen, na którym manewr wykonywany jest przez najbardziej doświadczonego nawigatora na statku. Procentowy udział poszczególnych typów awarii na akwenach ograniczonych i otwartych służy jako wytyczna do klasyfikacji akwenów nawigacyjnych. Przykładowo około 90% wejść na mieliznę [4] występuje na akwenach ograniczonych.

2. PROBLEM WYPRZEDZANIA NA OBSZARACH OGRANICZONYCH

Obszar ograniczony to środowisko, w obrębie którego występują liczne niebezpieczeństwa ograniczające manewry antykolizyjne. Charakteryzuje się on przede wszystkim ograniczoną przestrzenią do wykonania manewru. Podstawowym kryterium dla manewru wyprzedzania jest odległość krytyczna wyprzedzania S . Jest to odległość, w której należy rozpocząć manewr, by bezpiecznie wyprzedzić obiekt przy jednoczesnym utrzymaniu się w granicach obszaru ograniczonego toru wodnego. Odległość krytyczna wyprzedzania S , w której należy rozpocząć manewr jest jednym z czynników decydujących o skuteczności działania antykolizyjnego. Jeżeli działanie zostanie wykonane dla niewielkiej wartości parametru S , to można rozpatrywać następujące przypadki:

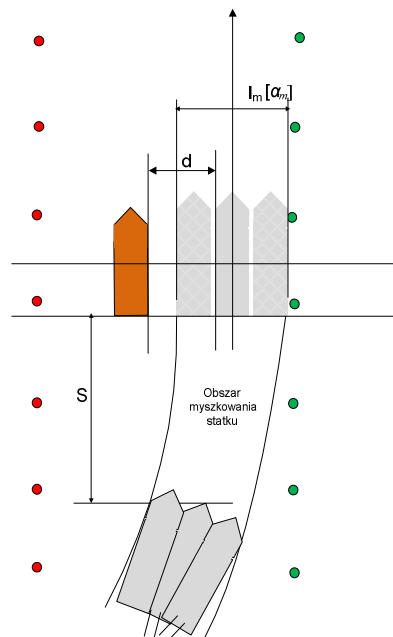
1. Spóźniona decyzja o podjęciu manewru wyprzedzania - mała odległość S od statku wyprzedzanego, lub zbyt duże wychylenie steru, lub zbyt duża prędkość, lub pierwszy, drugi element lub trzeci element jednocześnie.
2. Spóźniona decyzja o podjęciu manewru wyprzedzania - mała odległość S od statku wyprzedzanego, lub zbyt duża prędkość, zbyt mała odległość na trawersie statku wyprzedzanego powoduje wystąpienie sił hydrodynamicznych, które powodują zmianę kursu statku wyprzedzanego i spowodowanie kolizji ze statkiem wyprzedzanym.
3. Spóźniona decyzja o podjęciu manewru wyprzedzania - mała odległość S od statku wyprzedzanego lub zbyt duża prędkość.
4. Awaria statku wyprzedzanego.
5. Bezpieczny manewr wyprzedzania.



Rys. 1. Siły oddziaływania pomiędzy statkami dla stałych prędkości statków

Źródło: [1]

Ostatni przypadek dotyczy sytuacji, gdy manewr jest całkowicie efektywny i zakończony sukcesem, brak kolizji i wejścia na mieliznę jako końcowy efekt wyprzedzania. Pierwsze trzy sytuacje odnoszą się do zbyt późnej reakcji nawigatora, gdzie rezultatem podjętego działania jest uniknięcie zderzenia, lub wyjście poza granice obszaru ograniczonego, jednak zbyt gwałtowna zmiana kursu statku prowadzi do przekroczenia granic toru wodnego.



Rys. 2. Manewr wyprzedzania na akwenu ograniczonym

Źródło: [1]

Odległość krytyczna S prezentowana w literaturze [1, 5] kształtuje wielkość przedniej części domeny statku wyprzedzającego. Wielkości te oparte są na przede wszystkim na badaniach symulacyjnych i na wiedzy eksperckiej, tym samym nie podlegają weryfikacji w warunkach rzeczywistych. Wielkości domen obecnie stosowane zawierają duży margines bezpieczeństwa dla parametru S i większości przypadków nie odpowiadają granicy krytycznej, w jakiej należy wykonać efektywne wyprzedzanie. Poza tym, dla dużych wartości

parametru S wyznaczającego przednią część domeny, stosowane metody nie precyzują jaki manewr – wartość wychylenia płetwy steru α , należy wykonać by spełnić warunki pierwszego przypadku. Drugim parametrem rozważanym dla manewru wyprzedzania jest odległość boczna minięcia się statków d . Jest to odległość między jednostkami w trakcie wykonywania manewru. Powinna ona być taka, aby statki pod wpływem działania sił hydrodynamicznych nie uległy wzajemnemu przyssaniu. Zbyt mała odległość boczna d spowoduje zetknięcie się jednostek, co wyklucza skuteczność podjętego działania. Nadmierna wartość d może doprowadzić do drugiego przedstawionego powyżej przypadku, czyli uniknięcia zderzenia przy jednoczesnym przekroczeniu granic akwenu ograniczonego. Znajomość dopuszczalnych wartości parametru d pozwala na predykcję wykonywanych manewrów i ocenę czy takie skuteczne działanie jest w ogóle możliwe. Trzecim parametrem definiującym efektywność wyprzedzania jest wartość wychylenia płetwy steru α . Wartość ta nierozdzielnie jest połączona dwoma wcześniej opisanymi parametrami. Nie należy stosować maksymalnych wychyleń płetwy steru, zwłaszcza przy dużych prędkościach, ponieważ może to doprowadzić do awarii technicznej statku.

Na skutek podjęcia decyzji o manewrze wyprzedzania w zależności od S , kąt wychylenia steru, prędkości statku oraz działaniu wiatru i prądu odległość boczna na trawersie będzie ulegała zmianom. Dodatkowo myśzkowanie statku na kursie powoduje, że statek będzie zajmował obszar o szerokości większej od własnej szerokości statku B . Ponieważ w momencie wykonywania manewru wyprzedzania nieznane są w danej chwili błędy sterowania (oddziaływanie warunków zewnętrznych), dlatego należy przyjąć, że jest to parametr losowy. Wprowadza to losowe zaburzenie przyrostu szerokości pasa ruchu statku.

Błąd sterowania α_m jest błędem losowym wynikającym z doświadczenia, wiedzy i praktyki sternika Błąd sterowania α_m można opisać rozkładem normalnym $N(0, \sigma)$, gdzie σ zawiera się w przedziale $\langle 2^\circ, 4^\circ \rangle$. Odległość boczną d można określić wzorem [1]:

$$f_d(u) = \frac{S}{\sqrt{2\pi}\sigma \left(\left(u + \frac{B_1 + B_2}{2} \right)^2 + S^2 \right)^{1/2}} e^{-\frac{\left(\arctg \left(\frac{u + \frac{B_1 + B_2}{2}}{S} \right) - \alpha_0 \right)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

gdzie:

- S – odległość rozpoczęcia wyprzedzania [m],
- B_1, B_2 – szerokości statków [m],
- α_0 – zadany kąt sterowania [°].

Odległość boczna d wyprzedzania statków będzie zależała od czynnika losowego wynikającego z błędów sterowania i wpływu czynników zakłócających (wiatr, prąd).

Prawdopodobieństwo $p(u)$ znalezienia się statku wyprzedzającego w odległości u od statku wyprzedzanego wynosi:

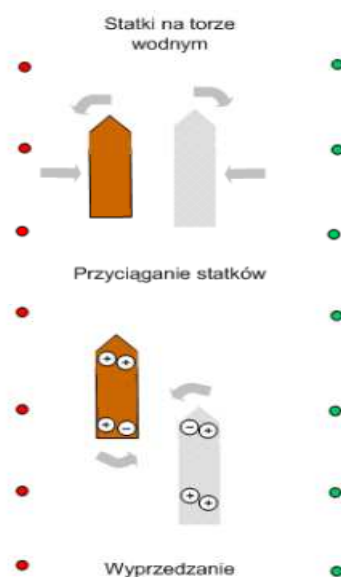
$$p(u) = \int_{u_1}^{u_2} f_d(u) du \quad (2)$$

gdzie:

- u_1 – minimalna odległość boczna minięcia się jednostek [m],
- u_2 – szerokość toru wodnego [m].

3. INTERAKCJE HYDRODYNAMICZNE WYSTĘPUJĄCE W MANEWRZE WYPRZEDZANIA

Szczególnie ważnym obowiązkiem statku wyprzedzającego jest zachowanie wystarczającej odległości i bocznego odstępu od statku wyprzedzanego. Wymaganie to podyktowane jest wieloma względami. Zbyt bliskie przechodzenie obok statku wyprzedzanego może spowodować szkodliwe dla niego uderzenie fali powstałej od przechodzenia dużego statku wyprzedzającego. Może ono wywołać u prowadzącego statek wyprzedzany obawę, że istnieje niebezpieczeństwo zderzenia i skłonić go do wykonania nieprzemysłanych i błędnych manewrów prowadzących do zderzenia lub wejścia na mieliznę.

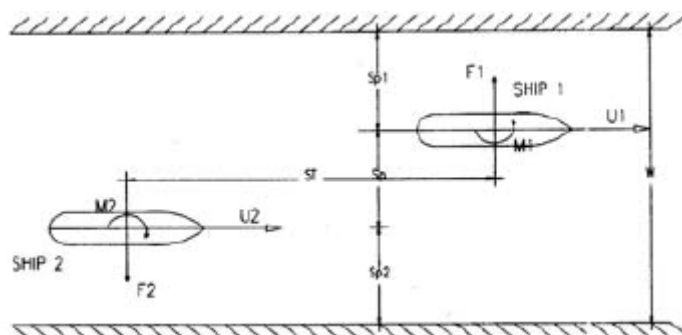


Rys. 3. Występowanie sił hydrodynamicznych podczas manewru wyprzedzania

Źródło: [1]

Ta sytuacja dotyczy również statku wyprzedzającego, który zbliżając się na niewielką odległość może wykonać działanie nieprzemysłane, doprowadzając do katastrofy. Może też wystąpić zjawisko przyssania polegające na wzajemnym przyciąganiu się statków, spowodowane różnicą ciśnień wody po obu burtach statku przy bliskim przechodzeniu obok siebie, w trakcie wyprzedzania. Zjawisko to najczęściej występuje na płytkiej wodzie przy dużej prędkości obu statków (wyprzedzanego i wyprzedzającego) oraz małej różnicy ich prędkości, zwłaszcza gdy duży statek wyprzedza mniejszy. Statek płynący ze znaczną szybkością powoduje powstanie zjawisk hydrodynamicznych, objawiających się zwiększonym ciśnieniem wody przy dziobie i rufie statku. Natomiast przy śródkręciu tworzy się różnica obniżonego ciśnienia wody. Podczas manewru wyprzedzania, gdy dziób statku wyprzedzającego zrówna się z rufą statku wyprzedzanego obserwuje się sumowanie działania sił odpychających dziób od rufy. W momencie, w którym dziób statku wyprzedzającego mija rufową część statku wyprzedzanego zauważalna jest tendencja do zwrotu w kierunku statku wyprzedzanego w wyniku działania sił przyciągających do burty statku wyprzedzanego. W dalszym okresie trwania manewru następuje wyrównanie sił, moment ten charakteryzuje największy wzrost oporów, wyrażający się zmniejszeniem prędkości obu jednostek. Moment, w którym dziób statku wyprzedzającego będzie w pozycji przed dziobem statku wyprzedzanego, charakteryzuje się wzrostem sił przyciągających. Osiągają one maksymalną wartość wówczas, gdy śródkręcie statku wyprzedzającego minie dziób statku wyprzedzanego, dziób jest przyciągany do śródkręcia w wyniku obniżenia powierzchni

wody w tej części oraz działania trzech sił: przyciągającej do rufy statku wyprzedzanego oraz dwóch sił wywołanych własną asymetrią opływu. Wzajemne oddziaływanie sił hydrodynamicznych pomiędzy statkami zanika, gdy rufa statku wyprzedzającego minie dziób statku wyprzedzanego. Podczas wyprzedzania statków wyróżnia się siły poprzeczne oraz moment poprzeczny dla obydwu jednostek.



Rys. 4. Układ współrzędnych dla manewru wyprzedzania

Źródło: [7]

Bezwymiarowe siły i momenty poprzeczne można wyrazić następująco [7]:

$$F_i(t) = -h_i \int_{-\frac{L_i}{2}}^{\frac{L_i}{2}} \Delta P(x_i, t) dx_i \quad (3)$$

$$M_i(t) = -h_i \int_{-\frac{L_i}{2}}^{\frac{L_i}{2}} x_i \Delta P(x_i, t) dx_i$$

$$C_{F_i} = \frac{F_i}{\frac{1}{2} \rho L_i d_i U_i^2} \quad (4)$$

$$C_{M_i} = \frac{M_i}{\frac{1}{2} \rho L_i^2 d_i U_i^2}$$

gdzie:

L_i – długość statku [m],

h_i – głębokość akwenu [m],

ΔP – różnica ciśnień wzdłuż kierunku ruchu statku,

d_i – zanurzenie statku [m],

C_{F_i} – siła poprzeczna oddziaływania hydrodynamicznego,

C_{M_i} – moment poprzeczny oddziaływania hydrodynamicznego,

ρ – gęstość wody.

Na podstawie badań numerycznych [7] określono, że maksymalne odchylenie poprzeczne statku wyprzedzanego występuje w sytuacji gdy stosunek prędkości obydwu jednostek wynosi 1,2. Maksymalne momenty i siły poprzeczne obserwuje się dla wolniejszych i mniejszych statków oraz wraz ze zmniejszaniem się głębokości akwenu. Badania numeryczne [7] nie zostały zweryfikowane na modelach fizycznych statków. Nie są ujęciem holistycznym opisującym wyprzedzanie. Dotyczą tylko i wyłącznie analizy odległości bocznej manewru bez uwzględnienia i wzajemnego powiązania z początkowym etapem wyprzedzania, czyli

odległością, w której statek zapoczątkuje wyprzedzanie oraz zmianą kursu dla realizacji manewru.

4. KOLIZJE STATKÓW PODCZAS MANEWRU WYPRZEDZANIA

Przedstawiona miara oceny prawidłowego manewru wyprzedzania na akwencie ograniczonym nie uwzględnia wpływu sił hydrodynamicznych, oddziałujących pomiędzy statkami. Określenie wpływu tych sił wymaga zastosowania zaawansowanych technik pomiarowych oraz dużych modeli fizycznych na akwencie otwartym, w celu ograniczenia wpływu efektu skali. Wyznaczenie granicznych parametrów manewru dla statku wyprzedzającego pozwoli na predykcję pozycji statku i realizację optymalnego sterowania statkiem podczas wyprzedzania. Opracowane modele mogą być zastosowane w systemach zarządzania bezpieczeństwem, systemach antykolizyjnych oraz systemach wspomagania decyzji dla statkowych systemów nawigacyjnych i lądowych systemów kontroli ruchu. Proces prowadzenia statku na akwencie ograniczonym jest ściśle związany z podjęciem działań mających na celu uniknięcie sytuacji kolizyjnej, tym samym efektywnym wykonaniem manewru, tak aby uniknąć zderzenia z innym obiektem i jednocześnie utrzymać się w granicach dostępnej przestrzeni manewrowej, której przekroczenie wiąże się z zagrożeniem dla statku i środowiska naturalnego. Możliwość dokładnego przewidywania zachowania się statku umożliwia proaktywne podejście do oceny bezpieczeństwa manewru wyprzedzania.

Rozwiązanie tego zagadnienia jest szczególnie istotne ze względu na zagęszczenie ruchu dużych statków na akwenach ograniczonych i brak wiedzy w zakresie miar bezpieczeństwa dla manewru wyprzedzania.



Rys. 5. Kollisiona podczas wyprzedzania na torze wodnym

Źródło: [5]

Obecnie możemy zaobserwować wiele sytuacji, w których przyczyną wypadków morskich jest błąd człowieka. Przykładem ilustrującym niebezpieczeństwo manewru wyprzedzania na obszarze ograniczonym są zdarzenia, które miały miejsce na rzece Elbie (podejściowy tor wodny do portu w Hamburgu. W marcu 2004 roku doszło do zderzenia dwóch kontenerowców (m/v „P&o Nedlloyd Finland” oraz m/v „Cosco Hamburg”) podczas manewru wyprzedzania [5]. Pomimo dobrych warunków pogodowych panujących na akwencie oraz prowadzenia statków przez doświadczonych pilotów niemieckich, zbyt późno rozpoczęto wyprzedzanie, wartość zmiany kursu statku wyprzedzającego była niewystarczająca. Dodatkowo błędnie oceniono odległość boczną mijania się statków, co doprowadziło do wystąpienia interakcji hydrodynamicznych pomiędzy statkami, a w efekcie

końcowym do kolizji. Oprócz zderzenia konsekwencją tego zdarzenia był wypadnięcie jednego z członków załogi za burtę w wyniku przechyłu jaki uzyskał statek wyprzedzany pod wpływem oddziaływania sił hydrodynamicznych.

PODSUMOWANIE

Statki pomimo wyposażenia w systemy wspomagania nawigacji takie jak: ARPA, ECDIS, AIS nie unikają sytuacji kolizyjnych. Nawet najbardziej zaawansowane i niezawodne systemy nie mogą być stosowane na akwenach ograniczonych i w miejscach gdzie występuje duże natężenie ruchu. Są to rejony, gdzie najczęściej dochodzi do kolizji statków. Możliwość modyfikacji i rozbudowy tych systemów o dodatkowe moduły przyczyni się do rozwoju systemów wspomagania decyzji umożliwiających wypracowanie prawidłowych decyzji antykolizyjnych dla statków płynących w bliskiej odległości. Badania pozwalające na określenie wpływu sił hydrodynamicznych na odległość boczną wyprzedzania i powiązanie ich z parametrami manewru umożliwią opracowanie modelu losowego, który będzie wykorzystany jako narzędzie w procesie decyzyjnym podczas wyprzedzania statku. Obecnie realizowane badania nad wpływem sił hydrodynamicznych opierają się na symulacjach komputerowych. Dodatkowo nie uwzględniają one powiązania odległości bocznej z odległością rozpoczęcia manewru i wyborem zmiany kursu celem uniknięcia kolizji.

BIBLIOGRAFIA

1. Burciu Z., Lizakowski P.: Analiza ryzyka manewru wyprzedzania w oparciu o sieci bayesa. Problemy eksploatacji, Radom 2009.
2. Gucma L.: Modelowanie czynników ryzyka zderzenia jednostek pływających z konstrukcjami portowymi i pełnomorskimi. Akademia Morska w Szczecinie, Studia nr 44, Szczecin 2005.
3. Gucma L., Smalko Z.: Selected problems and Methods of Navigational Risk Assessment. Proc. 12th International Congress IMAM Lisbon 2005, vol. 1.
4. Gucma S.: Inżynieria ruchu morskiego. Wydawnictwo Okrętownictwo i Żegluga, Gdańsk 2001.
5. Investigation Report 45/04: Collision between CMV Cosco Hamburg and CMV P&O Nedlloyd Finland on 01 March 2004 on the Lower Elbe/off Buoy 91 with the Heath of one seaman. Bundesstelle fur Seeunfalluntersuchund, Hamburg 2006.
6. Lizakowski P.: System antropotechniczny człowiek statek – efektywność manewru wyprzedzania w ograniczonej przestrzeni. XXXVII Zimowa Szkoła Niezawodności Szczyrk 2009.
7. Varyani K., Krishnankutty P.: New generic mathematical model to predict hydrodynamic interaction effects for overtaking maneuvers in simulators. Journal of Marine Science and Technology 2004.

HYDRODYNAMIC INTERACTION BETWEEN SHIPS DURING OVERTAKING MANOEUVRE

Abstract

Safety of overtaking maneuvers is an essential point of navigation carried out in restricted areas. The specificity of such areas causes reduce of manoeuvring available space. One of the elements determining no collision overtaking manoeuvre is the correct evaluation of the lateral distance between two ships during the action. The paper presents the causes of vessel collision during

overtaking in restricted areas.

Autor:

dr inż. **Piotr Lizakowski** – Akademia Morska w Gdyni