

Analiza ryzyka manewrowania statków w procesie projektowania morskich dróg wodnych i portów

Prof. dr hab. inż. kpt. ż.w. Stanisław Gućma, dr hab. inż. kpt. ż.w. Wojciech Ślącza, prof. nadzw. AM w Szczecinie
Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Nawigacyjny

Formalna Analiza Bezpieczeństwa (FSA) jest metodologią często wykorzystywaną na świecie przy projektowaniu morskich dróg wodnych i portów oraz określaniu warunków ich bezpiecznej eksploatacji. Metodologia ta jest stosowana bezwzględnie przy projektowaniu oraz określaniu warunków bezpiecznej eksploatacji portów obsługujących statki przewożące ładunki niebezpieczne. Światowe instytucje zajmujące się standaryzacją prac projektowych w sektorze morskim uwzględniają procedurę FSA w zaleceniach projektowych, wskazując jej istotne elementy mające wpływ na optymalny dobór parametrów techniczno-eksploatacyjnych drogi wodnej w stosunku do możliwości eksploatacji jednostki pływającej.

PIANC w *The World Association for Waterborne Transport Infrastructure* [17] określiło szereg wytycznych do projektowania dróg wodnych. Większość z proponowanych wytycznych oparto na wynikach badań symulacyjnych lub analizie statystycznej. Wskazuje metodologię FSA jako jeden z bardzo ważnych elementów, którą należy uwzględniać podczas projektowania drogi wodnej. W dokumencie tym opisuje się zalecaną przez nich metodologię analizy ryzyka.

Międzynarodowa Organizacja Morska (IMO) wskazuje na możliwość wykorzystania narzędzia zarządzania ryzykiem zaproponowanego przez IALA dla portów i akwenów ograniczonych [11]. Narzędzie to umożliwia oszacowanie poziomu ryzyka eksploatacji drogi wodnej akceptowalnego przez administrację danego kraju, jak i jego obywateli.

Maritime Analysis and Risk Investigation Network (MARIN) będąca instytucją zajmującą się badaniami wypadków i katastrof morskich rekomenduje badania nad bezpieczeństwem różnych obszarów eksploatacji portów i dróg wodnych z uwzględnieniem sfery ochrony środowiska oraz oddziaływania społecznego. W zakresie badań nad parametrami technicznymi eksploatowanych statków oraz parametrów strumienia ruchu w porcie wskazuje na konieczność wykorzystania pełnej procedury FSA [1].

Również poszczególne państwa wprowadzają wewnętrzne regulacje prawne poprawiające bezpieczeństwo w swoich portach. Wydają rezolucje lub poprzez administrację morską zalecenia umożliwiające szacowanie ryzyka towarzyszącemu eksploatacji portów jako bardzo dużych przedsięwzięci o strategicznym charakterze dla gospodarki kraju. W takich wytycznych definiowane są procedury szacowania ryzyka dla stanu obecnego, jak i związane z projektowaniem portów oraz dróg wodnych. Wytyczne te i przewodniki wykorzystują pełną procedurę FSA [18]. Przykładem norm krajowych do szacowania ryzyka w portach morskich są normy brytyjskie (*UK Port Marine Safety Code*), amerykańskie (*Operational Risk Management*) itp.

W polskim systemie prawnym, w przeciwieństwie do krajów Europy Zachodniej, można zauważyć lukę w zakresie systemowego podejścia do zarządzania ryzykiem zarówno nowo

powstających, jak i istniejących morskich dróg wodnych oraz portów. Jedynym w tym zakresie obligatoryjnym dokumentem jest tzw. „analiza nawigacyjna”, którą wykonuje się zgodnie z rozporządzeniem ministra właściwego do spraw gospodarki morskiej. Analiza ta powinna swym zakresem obejmować ocenę bezpieczeństwa przeprowadzoną w obiektywny i mierzalny sposób, co jest zgodne z rekomendacjami IMO [10, 11].

Projektanci i zespoły naukowe na świecie (działające podobnie jak zespół Inżynierii Ruchu Morskiego Akademii Morskiej w Szczecinie) wręcz zalecają włączanie analizy ryzyka, a nawet całej procedury FSA, jako metody oceny bezpieczeństwa eksploatacji istniejącej lub projektowanej infrastruktury portowej [23].

Istnieje szereg metod szczegółowego szacowania ryzyka bezpieczeństwa żeglugi [2, 3, 12, 13, 19, 22], w tym polska metoda wymiarowania szerokości bezpiecznego obszaru manewrowego dróg wodnych wykorzystująca modele ryzyka nawigacyjnego opracowana w Akademii Morskiej w Szczecinie [6, 9]. Metody te jednak wymagają przeprowadzenia szczegółowych badań statystycznych lub symulacyjnych, które nie zawsze są stosowane przy projektowaniu dróg wodnych czy też określaniu warunków ich bezpiecznej eksploatacji. Z tego względu opracowano uniwersalną, praktyczną metodę oceny ryzyka, którą można zastosować zarówno przy projektowaniu wykorzystującego metodologię deterministyczną (empiryczną), jak i probabilistyczną (symulacyjną, statystyczną). Opracowana uniwersalna metoda oceny ryzyka manewrowania statków na morskich drogach wodnych spełnia wymogi Formalnej Analizy Bezpieczeństwa [4, 7]. W artykule będzie ona przedstawiona i nazwana metodą formalnej analizy ryzyka.

UNIWERSALNA METODA FORMALNEJ ANALIZY RYZYKA MANEWROWANIA STATKU NA MORSKICH DROGACH WODNYCH I W PORTACH

W inżynierii ruchu morskiego, podobnie jak w większości zastosowań inżynierskich, ryzyko R definiuje się jako możliwość powstania strat w określonym przedziale czasu i wyraża się go w postaci iloczynu prawdopodobieństwa wypadku oraz strat powstałych w jego wyniku. Straty powstałe w wyniku wypadku charakteryzuje wyznacznik skutków S nazywany potocznie „skutkami”. Przy wielu zagrożeniach na określonym odcinku drogi wodnej ryzyka poszczególnych rodzajów wypadków sumują się:

$$R_i = \sum_{q=1}^m P_{iq} I_{Ri} S_{iq} \quad (1)$$

gdzie:

R_i – ryzyko wystąpienia wypadku na i -tym odcinku drogi wodnej,

P_{iq} – prawdopodobieństwo wystąpienia q -tego rodzaju wypadku nawigacyjnego na i -tym odcinku drogi wodnej,

I_{Ri} – roczna częstość wykonania danego manewru na i -tym odcinku drogi wodnej,

S_{iq} – skutki q -tego rodzaju wypadku na i -tym odcinku drogi wodnej (wyznacznik skutków).

Metoda formalnej analizy ryzyka polega na wykorzystaniu specjalnie opracowanej macierzy oceny ryzyka nawigacyjnego, gdzie badane są ściśle określone rodzaje manewrów wykonywanych przez statki danego rodzaju i wielkości na drogach wodnych oraz w portach. Argumentami wejściowymi do tej macierzy są odpowiednio prawdopodobieństwo wypadku i jego skutki dla rozpatrywanego scenariusza awaryjnego (rodzaju wypadku). W wyniku przecięcia odpowiedniej kolumny i wiersza macierzy otrzymuje się ryzyko wystąpienia badanego scenariusza awaryjnego określane w stosunku do ryzyka dopuszczalnego. Macierz formalnej analizy ryzyka na morskich drogach wodnych i w portach (*Risk Assessment Matrix* – RAM) przedstawiono w tabl. 1.

Scenariusze awaryjne (rodzaje wypadków) precyzowane są w przypadku manewrów wykonywanych przez statki danego rodzaju i wielkości na podstawie analizy zagrożeń i statystyk wypadków na określonych akwenach.

Na akwenach ograniczonych, którymi zajmuje się inżynieria ruchu morskiego, można wyróżnić następujące charakterystyczne manewry oraz postój statku:

- Przejście torem wodnym;
- Wejście do portu;
- Manewry w basenie portowym (w tym obracanie i cumowanie);
- Postój przy nabrzeżu.

Scenariusze awaryjne są określone na podstawie analizy zagrożeń dla każdego charakterystycznego manewru, rodzaju wypadku oraz jego przyczyn. Przy wykonywaniu charakterystycznych manewrów na akwenach ograniczonych rozróżnia się następujące rodzaje wypadków i ich przyczyn [6]:

1. Przejście torem wodnym

1.1. Wejście na mieliznę:

- przekroczenie dostępnego akwenu żeglugowego na skutek pogorszenia warunków nawigacyjnych,
- awaria steru (zacięcie steru wyłożonego na burtę mielizny),
- zacięcie steru w pozycji *midship*, awaria maszyny lub agregatów prądotwórczych.

1.2. Kolizja z innym statkiem:

- przekroczenie dostępnego akwenu żeglugowego na skutek pogorszenia warunków nawigacyjnych,
- awaria steru (zacięcie steru wyłożonego na burtę mijanego statku).

1.3. Kolizja z pływającym znakiem nawigacyjnym:

- przekroczenie dostępnego akwenu żeglugowego na skutek pogorszenia warunków nawigacyjnych,
- awaria steru (zacięcie steru wyłożonego na burtę znaku nawigacyjnego).

2. Wejście do portu

2.1. Uderzenie w budowlę hydrotechniczną:

- przekroczenie dostępnego akwenu żeglugowego na skutek pogorszenia warunków nawigacyjnych,
- awaria steru (zacięcie steru wyłożonego na burtę budowli hydrotechnicznej),
- zacięcie steru w pozycji *midship*, awaria maszyny lub agregatów prądotwórczych,
- awaria holownika.

2.2. Kolizja z innym statkiem:

- przekroczenie dostępnego akwenu żeglugowego na skutek pogorszenia warunków nawigacyjnych,
- awaria steru (zacięcie steru wyłożonego na burtę mijanego statku).

2.3. Uderzenie w zacumowany statek:

- przekroczenie dostępnego akwenu żeglugowego na skutek pogorszenia warunków nawigacyjnych,
- awaria steru (zacięcie steru wyłożonego na burtę przycumowanego statku),
- zacięcie steru w pozycji *midship*, awaria maszyny lub agregatów prądotwórczych,
- awaria holowników.

3. Manewry w basenie portowym i cumowanie

3.1. Uderzenie w zacumowany statek:

- przekroczenie dostępnego akwenu żeglugowego na skutek pogorszenia warunków nawigacyjnych,
- awaria steru, maszyn lub agregatów prądotwórczych,
- awaria holowników.

3.2. Uderzenie w budowlę hydrotechniczną:

- przekroczenie dostępnego akwenu żeglugowego na skutek pogorszenia warunków nawigacyjnych,
- awaria steru, maszyny lub agregatów prądotwórczych,
- awaria holowników.

3.3. Uderzenie w nabrzeże cumowania ($V > V_{dop}$):

- przekroczenie dopuszczalnej energii kinetycznej na skutek pogorszenia warunków nawigacyjnych,
- awaria steru, maszyny lub agregatów prądotwórczych,
- awaria holowników.

4. Postój przy nabrzeżu

4.1. Zerwanie cum:

- krytyczne warunki hydrometeorologiczne.

4.2. Uszkodzenie urządzeń cumowniczych:

- krytyczne warunki hydrometeorologiczne.

Tabl. 1. Macierz formalnej analizy ryzyka na morskich drogach wodnych i w portach (Risk Assessment Matrix – RAM)

Skutki wypadku				Prawdopodobieństwo wypadku				
Skala	Bezpieczeństwo ludzi	Bezpieczeństwo środowiska	Bezpieczeństwo ekonomiczne	Bliskie zera	Bardzo niskie	Niskie	Podwyższone	Wysokie
				1/10000 lat	1/1000 lat	1/100 lat	1/10 lat	1/rok
1 poważne	Ofiary śmiertelne – pasażerowie, osoby postronne	Poważne skażenie środowiska, utrzymujące się wysokie przekroczenie norm środowiskowych, interwencja niezależnych bądź rządowych organizacji	Straty: Wartość 2 statków z ładunkiem					
2 znaczące	Ofiary śmiertelne – załoga	Znaczne skażenie środowiska rozległe na obszarze powyżej 1 km ² , wysokie przekroczenie norm środowiskowych, podniesienie alarmu przez niezależne bądź rządowe organizacje	Straty: Wartość 1 statku z ładunkiem				CZERWONY OBSZAR Ryzyko musi zostać zmniejszone	
3 umiarkowane	Ciężko ranni – trwałe kalectwo	Umiarkowane skażenie środowiska rozległe na obszarze powyżej 10 000 m ² , wielokrotne sporadyczne przekroczenie poziomu ALARP*, publiczne obawy wyrażone przez niezależne bądź rządowe organizacje	Straty: 10 – 100 mln PLN lub postój w stoczni 1 miesiąc			ŻÓŁTY OBSZAR Zmniejszyć ryzyko do poziomu ALARP		
4 nieznaczne	Lekko ranni – wymagający opieki medycznej	Nieznaczne skażenie środowiska, ograniczone do obszaru operacji, liczne przekroczenia norm oceniane na poziomie ALARP, brak uwagi niezależnych i rządowych organizacji	Straty: 1 – 10 mln PLN lub postój w stoczni 3 – 10 doby		ZIELONY OBSZAR Ryzyko dopuszczalne			
5 nieistotne	Brak ofiar śmiertelnych i rannych	Znikome skażenie środowiska o charakterze lokalnym, drobne przekroczenia dopuszczalnych norm, lecz oceniane na poziomie ALARP, brak zaangażowania niezależnych i rządowych organizacji	Straty: do 1 mln PLN lub postój w stoczni 3 doby	BIAŁY OBSZAR Nie wymaga żadnych działań				

*ALARP – as low as reasonably practicable

PRAWDOPODOBIEŃSTWO WYPADKU NA MORSKICH DROGACH WODNYCH I W PORTACH

Analizując rodzaje wypadków i ich przyczyny, które mogą wystąpić w czasie manewrowania statku na morskich drogach wodnych, można wyróżnić dwie generalne przyczyny ich powstawania, których prawdopodobieństwo wystąpienia określa się wykorzystując różne metody. Są to:

- Przekroczenie dostępnego akwenu żeglugowego na skutek pogorszenia warunków nawigacyjnych;
- Awarie techniczne urządzeń okrętowych: steru, silnika głównego, agregatów prądotwórczych lub holowników.

Prawdopodobieństwo przekroczenia dostępnego akwenu żeglugowego na skutek pogorszenia warunków nawigacyjnych określone jest według następujących założeń.

Statek wykonujący dany manewr na dostępnym akwenu żeglugowym w czasie trwania tego manewru zajmuje określony obszar wyznaczony przez jego kolejne położenia na tym akwenu. Parametry tego obszaru mają charakter losowy i zależą od wielu różnorodnych czynników. Obszar ten, obliczony na określonym poziomie ufności, nazywa się bezpiecznym obszarem manewrowym $\mathbf{d}(1 - \alpha)$ [5]. Tak zdefiniowany bezpieczny ob-

szar manewrowy można przedstawić w postaci zbioru punktów $\mathbf{d}_{ijk}$, a podstawowy warunek bezpieczeństwa nawigacji zapisać następująco [6]:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{d}_{ijk}(1 - \alpha) &\subset \mathbf{D}(t) \\ \bigwedge_{p(x,y) \in \mathbf{D}(t)} h(x,y,t) &\geq T(x,y,t) + \Delta(x,y,t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

gdzie:

$\mathbf{D}(t)$ – dostępny akwen żeglugowy (spełniony warunek bezpiecznej głębokości w momencie t),

$\mathbf{d}_{ijk}(1 - \alpha)$ – bezpieczny obszar manewrowy na poziomie ufności $(1 - \alpha)$.

Zbiory punktów dostępnego akwenu żeglugowego $\mathbf{D}(t)$, jak i bezpiecznego obszaru manewrowego $\mathbf{d}_{ijk}(1 - \alpha)$ można utożsamiać z obszarami o określonych parametrach liniowych. Na wielu rodzajach torach wodnych podstawowymi parametrami liniowymi decydującymi o bezpieczeństwie wykonania badanego manewru są ich szerokości. W związku z powyższym warunek bezpiecznego wykonania określonego manewru można przekształcić do następującej postaci:

$$D(t)_{ijk} \geq d_{ijk(1-\alpha)} \quad (3)$$

gdzie:

$D(t)_{ijk}$ – szerokość dostępnego akwenu żeglugowego spełniającego warunek bezpiecznej głębokości w momencie t (dostępny akwen dla żeglugi i -tego statku wykonującego j -ty manewr w k -tych warunkach nawigacyjnych),

$d_{ijk(1-\alpha)}$ – szerokość bezpiecznego obszaru manewrowego i -tego statku, wykonującego j -ty manewr w k -tych warunkach nawigacyjnych określony na poziomie ufności $(1 - \alpha)$

Z powyższych rozważań wynika, że zapewnienie bezpieczeństwa nawigacji na drogach wodnych jest ściśle związane z doбором odpowiedniego (bezpiecznego) poziomu ufności przy określaniu parametrów tych dróg i parametrów systemów nawigacyjnych. Szerokość bezpiecznego obszaru manewrowego na określonym poziomie ufności jest określana metodami symulacyjnymi [5, 6] lub metodą deterministyczno-probabilistyczną CIRM, w której składowa nawigacyjna ma charakter probabilistyczny [9]. Należy przy tym zauważyć, że metody te uwzględniają czynnik ludzki.

Powyższe rozważania dotyczą zarówno szerokości drogi wodnej ograniczonej obustronnie bezpieczną izobatą, jak i jednostronnej odległości do bezpiecznej izobaty (niebezpieczeństwa). Bezpieczna szerokość obszaru manewrowego „statku maksymalnego” określana jest dla dopuszczalnych prędkości wiatru i prądu oraz najmniej korzystnych kierunków ich działania wyznaczonych przez zbiór bezpiecznych warunków eksploatacji „statku maksymalnego”. Biorąc powyższe pod uwagę, przyjęto, że w przypadku, gdy szerokość bezpiecznego obszaru manewrowego statku jest równa szerokości dostępnego akwenu żeglugowego:

$$d_{i(1-\alpha)} = D_i \quad (4)$$

to prawdopodobieństwo przekroczenia przez statek szerokości dostępnego akwenu żeglugowego odpowiednio wynosi [6]:

$P_{ai} = 3 \cdot 10^{-3}$ – statki z ładunkiem niebezpiecznym,

$P_{ai} = 5 \cdot 10^{-2}$ – statki pozostałe.

Bezpieczna szerokość obszaru manewrowego „statku maksymalnego” zależy od prędkości oraz kierunku wiatru i prądu, a przy najmniej korzystnych kierunkach wiatru i prądu dla jakich przeprowadzane są badania symulacyjne zależy wyłącznie od ich prędkości:

$$d_{(1-\alpha)} = f(V_w; V_p) \quad (5)$$

W warunkach eksploatacyjnych statków handlowych przyjęto:

- „statek maksymalny” nie jest dopuszczany do żeglugi na torze wodnym, gdy prędkość wiatru przekracza wartość dopuszczalną $V_w > V_w^{dop}$,
- w trakcie przejścia torem wodnym może dojść do zwiększenia prędkości wiatru nie więcej niż o 2,5 m/s.

Badania symulacyjne wykazały, że statystycznie istotne zmniejszenie szerokości bezpiecznego obszaru manewrowego występuje przy zmniejszeniu prędkości wiatru o około 2,5 m/s [6].

W portach polskich dopuszczalna prędkość wiatru dla statków handlowych określona przez przepisy portowe (nie dotyczy to promów morskich) wynosi około 10 m/s ($5 \div 6^\circ B$), a wiatry w przedziale 7,5 ÷ 12,5 m/s występują około 30 ÷ 40 dni w roku [14, 21], czyli przybliżona częstotliwość występowania wiatrów o prędkości w powyższym przedziale wynosi około 10% czasu w skali roku, a roczna częstość wystąpienia wiatru o prędkości w przedziale maksymalnym dla określonego manewru wynosi:

$$P_h = 0,1$$

Uwzględniając częstość wystąpienia wiatru o prędkości w przedziale maksymalnym dla danego manewru, prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku (przekroczenie dostępnego akwenu żeglugowego podczas przechodzenia „statku maksymalnego” torem wodnym) określa się następującą zależnością:

$$P_a = P_{ai} P_h I_r \quad (6)$$

Prawdopodobieństwo przekroczenia dostępnego akwenu żeglugowego „statku maksymalnego” przy zastosowaniu określonych (projektowych) poziomów ufności dla dopuszczalnej prędkości wiatru 10 m/s wynosi:

$P_a = 3 \cdot 10^{-4}$ – statki z ładunkiem niebezpiecznym – projektowy poziom ufności $(1 - \alpha) = 0,997$ [4, 6, 7],

$P_a = 5 \cdot 10^{-3}$ – pozostałe statki – projektowy poziom ufności $(1 - \alpha) = 0,95$ [4, 6, 7].

Prawdopodobieństwo przekroczenia dostępnego akwenu żeglugowego statku dla innej dopuszczalnej prędkości wiatru będzie zależało od rocznej częstotliwości wystąpienia wiatru (P_h) w przedziale: $(V_w^{dop} - 2,5 \text{ m/s}) \div (V_w^{dop} + 2,5 \text{ m/s})$.

Prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku spowodowanego awarią techniczną steru, maszyny lub holowników określone jest według przedstawionych poniżej procedur.

Niezawodność techniczna utożsamiona jest z bezawaryjnym wykonaniem określonego manewru. Zależy ona od niezawodnej pracy: silnika głównego, silników pomocniczych z generatorami, urządzenia sterowego i holowników. Każde z wyżej wymienionych urządzeń charakteryzuje określone prawdopodobieństwo niezawodnej pracy w czasie t :

$P_1(t)$ – prawdopodobieństwo niezawodnej pracy silnika głównego,

$P_2(t)$ – prawdopodobieństwo niezawodnej pracy agregatorów prądotwórczych,

$P_3(t)$ – prawdopodobieństwo niezawodnej pracy urządzeń sterowych,

$P_4(t)$ – prawdopodobieństwo niezawodnej pracy holownika.

Do obliczeń prawdopodobieństwa niezawodnej pracy powyższych urządzeń wykorzystuje się funkcję intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$ w czasie t , która jest funkcją gęstości powstawania uszkodzenia, pod warunkiem, że do tej chwili uszkodzenia nie było.

Rozpatrując wyłącznie fazę stabilną pracy badanych urządzeń okrętowych (przestrzegając tego instytucje klasyfikacyjne), ustalono, że funkcja ryzyka $\lambda(t)$ nie zależy od czasu i jest stała ($\lambda = \text{const}$), przy czym prawdopodobieństwo niezawodnej pracy poszczególnych urządzeń można zapisać w postaci [5, 8]:

$$\begin{aligned} P_1(t) &= 1 - \lambda_1 \cdot \Delta t \\ P_2(t) &= 1 - \lambda_2 \cdot \Delta t \\ P_3(t) &= 1 - \lambda_3 \cdot \Delta t \\ P_4(t) &= 1 - \lambda_4 \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (7)$$

Przy założeniu, że uszkodzenie każdego z wymienionych urządzeń może stać się w określonych okolicznościach przyczyną wypadku statku, prawdopodobieństwo niezawodnej pracy wszystkich urządzeń jest iloczynem prawdopodobieństwa niezawodnej pracy poszczególnych urządzeń:

$$P_t = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \quad (8)$$

co z przybliżeniem do drugiego rzędu wielkości można zapisać w postaci:

$$P_t = 1 - (\lambda_1 \cdot \Delta t_1 + \lambda_2 \cdot \Delta t_2 + \lambda_3 \cdot \Delta t_3 + \lambda_4 \cdot \Delta t_4) \quad (9)$$

gdzie:

- Δt_1 – przedział czasu w trakcie wykonywania manewru, w którym uszkodzenie silnika głównego powoduje zagrożenie wystąpienia wypadku,
- Δt_2 – przedział czasu w trakcie wykonywania manewru, w którym uszkodzenie agregatów prądotwórczych powoduje zagrożenie wystąpienia wypadku,
- Δt_3 – przedział czasu w trakcie wykonywania manewru, w którym uszkodzenie steru powoduje zagrożenie wystąpienia wypadku,
- Δt_4 – przedział czasu w trakcie wykonywania manewru, w którym uszkodzenie holownika powoduje zagrożenie wystąpienia wypadku,
- $\lambda_1 \div \lambda_4$ – intensywność uszkodzeń poszczególnych urządzeń i systemów.

Nie każda zawodność rozpatrywanych urządzeń w czasie manewrowania na badanym akwenu prowadzi do wypadku statku. Zależy to dodatkowo od następujących czynników:

- miejsca wystąpienia uszkodzenia na badanym akwenu,
- warunków hydrometeorologicznych panujących w czasie wykonywanego manewru,
- zakresu uszkodzenia konkretnego urządzenia.

Rozpatrując poszczególne czynniki, można stwierdzić, że:

1. Tylko na niektórych pozycjach badanego akwenu uszkodzenie danego urządzenia prowadzi do wypadku statku. Uwzględnia się to, określając indywidualnie dla danego akwenu poszczególne przedziały czasu;
2. Tylko w niektórych warunkach hydrometeorologicznych, panujących w czasie wykonywania manewru, może dojść do wypadku statku po uszkodzeniu danego urządzenia;
3. Tylko przy pewnych zakresach uszkodzenia niektórych urządzeń może dojść do wypadku statku (np. przy zacięciu steru w określonym położeniu).

Biorąc pod uwagę powyższe czynniki, prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku podczas wykonywania określonego manewru spowodowanego awarią techniczną któregoś z opisanych urządzeń statkowych można zapisać następująco [8]:

$$P_{at} = I_r (\lambda_1 \cdot \Delta t_1 \cdot p_{h1} + \lambda_2^2 \cdot \Delta t_2^2 \cdot p_{h2} + \lambda_3 \cdot \Delta t_3 \cdot p_{h3} \cdot p_{z3} + \lambda_4^2 \cdot \Delta t_4^2 \cdot p_{h4}) \quad (10)$$

Tabl. 2. Intensywność uszkodzeń i wartość estymowana średniej bezawaryjnego czasu pracy [8]

Rodzaj urządzenia	Wartość estymowana średnia bezawaryjnego czasu pracy T [h]	Intensywność uszkodzeń λ [1/h]
Silnik główny	3000	0,00033
Silnik pomocniczy z generatorami	1000	0,001
Urządzenie sterowe	6500	0,00015
Radar	300	0,0033
Holowniki	650	0,0015

Intensywność uszkodzeń holowników oblicza się, wychodząc z założenia, że niezawodność jego urządzeń jest analogiczna jak urządzeń statkowych, czyli:

$$\lambda_4 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \quad (11)$$

Intensywność uszkodzeń urządzeń mających wpływ na bezpieczeństwo manewrowania przedstawiono w tabl. 2.

SKUTKI WYPADKÓW NA MORSKICH DROGACH WODNYCH I W PORTACH

Analizując rodzaje wypadków, które mogą wystąpić na morskich drogach wodnych i w portach oraz ich konsekwencje, można wyróżnić cztery rodzaje wypadków, których skutki określa się różnymi metodami. Są to:

- wejście statku na mieliznę,
- niezamierzone uderzenie statku w brzeg lub zacumowany statek,
- kolizja z innym statkiem w ruchu,
- uszkodzenie statku lub nabrzeża podczas cumowania.

Skutki wejścia statku na mieliznę zależą od takich czynników jak: maksymalna energia kinetyczna statku w momencie kontaktu z dnem i dopuszczalna energia kontaktu statku z dnem, przy której możliwe jest samodzielne zejście z mielizny. Wyznacznik skutków można przedstawić w następującej postaci [5, 6]:

$$S_m = \frac{E(t)}{E_{dop}^m} \quad (12)$$

gdzie:

- $E(t)$ – energia kinetyczna statku w momencie kontaktu kadłuba z dnem,
- E_{dop}^m – dopuszczalna energia kontaktu statku z dnem, przy której możliwe jest samodzielne zejście z mielizny.

W przypadku, gdy wartość S_m zawiera się w granicach $0 < S_m \leq 1$, wypadek nie powoduje istotnych strat i statek jest w stanie samodzielnie zejść z mielizny (lub przy pomocy manewrujących z nim holowników) bez uruchomienia specjalnej akcji ratowniczej i bez uszkodzenia kadłuba. Natomiast gdy $S_m > 1$, przy wypadku występują uszkodzenia kadłuba statku lub w celu jego ściągnięcia z mielizny należy podejmować specjalną akcję ratowniczą wiążącą się z nakładami finansowymi (wstrzymanie ruchu, sprzęt itp.). Uszkodzenia kadłuba często łączą się z koniecznością organizowania akcji ratowniczej.

Energię kinetyczną statku w momencie kontaktu kadłuba z dnem uwzględniającą masę wody towarzyszącej określa się z następującej zależności [20]:

$$E(t) = \frac{1}{2} M \left(1 + \frac{2T}{B} \right) V^2 \text{ [Nm]} \quad (13)$$

Przy wykorzystaniu uproszczonych zależności [5] dopuszczalną energię kinetyczną, przy której możliwe jest samodzielne zejście statku z mielizny, można określić następująco:

$$E_{dop}^m = \frac{3 \cdot U^2}{L_{pp} \cdot B \cdot \gamma \cdot \mu \cdot \text{tg } \theta'} \text{ [Nm]} \quad (14)$$

Maksymalna siła uciągu przy zejściu z mielizny jest równa sile uciągu na palu statku oraz sile uciągu na palu holowników, które brały udział w manewrowaniu statku na danym akwenie:

$$U = U_s^{pal} + U_h^{pal} \quad [\text{N}] \quad (15)$$

gdzie:

V – prędkość statku w momencie wejścia statku na mieliznę [m/s],

M – masa statku [kNs²/m],

U – siła uciągu przy zejściu z mielizny [N],

U_s^{pal} – uciąg statku na palu przy pracy maszyny wstecz [N],

U_h^{pal} – uciąg na palu asystujących holowników [N],

γ – ciężar właściwy wody [N/m³],

μ – współczynnik tarcia kadłuba o grunt (zależy od rodzaju gruntu),

θ' – kąt nachylenia skarpy w osi symetrii statku wchodzącego na mieliznę.

Wykorzystując przybliżone metody rozwiązań, uciąg statku na palu określamy przy pomocy następującej zależności empirycznej [5]:

$$U_s^{pal} = k \cdot f \cdot N_n \cdot 7220 \quad [\text{N}] \quad (16)$$

gdzie:

N_n – sumaryczna moc silników głównych [kW],

k – współczynnik wykorzystaniu uciągu zależny od nastawy maszyny:

• CN $k = 1$,

• CW $k = 0,3 \div 0,5$ (średnia 0,4),

f – empiryczny współczynnik przeliczeniowy zależny od rodzaju statku i napędu:

• statki handlowe $f = 0,005 \div 0,011$ (średnia 0,008),

• holowniki (śruba konwencjonalna) $f = 0,010 \div 0,016$ (średnia 0,013),

• holowniki (dysza Korta) $f = 0,017 \div 0,025$ (średnio 0,021),

V_{CN} – prędkość statku przy całej naprzód [węzły].

Skutki niezamierzonego uderzenia statku w budowlę hydrotechniczną, brzeg lub zacumowany statek zależą od takich czynników jak maksymalna energia uderzenia i dopuszczalna energia uderzenia, przy której nie będzie uszkodzone poszycie kadłuba statku. Wyznacznik skutków można przedstawić w następującej postaci:

$$S_u = \frac{E(t)}{E_{dop}^u} \quad (17)$$

gdzie:

S_u – wyznacznik skutków uderzenia statku w budowlę hydrotechniczną, brzeg lub zacumowany statek,

$E(t)$ – maksymalna energia kinetyczna statku w momencie uderzenia w budowlę hydrotechniczną lub przycumowany statek [kJ],

E_{dop}^u – dopuszczalna energia uderzenia statku w budowlę hydrotechniczną, przy której nie będzie uszkodzone poszycie kadłuba statku [kJ].

W przypadku gdy wartość S_u zawiera się w granicach $0 < S_u \leq 1$, wypadek nie powoduje istotnych strat ani nie zagraża środowisku, a statek jest w stanie samodzielnie kontynuować określony manewr. Natomiast w przypadku gdy $S_u > 1$, występują uszkodzenia kadłuba statku, które wymagają określonych nakładów na ich usunięcie.

Maksymalna energia kinetyczna statku w momencie niezamierzonego uderzenia w budowlę hydrotechniczną lub zacumowany statek określa się, wykorzystując przybliżoną zależność [5]:

$$E(t) = \frac{M \cdot u^2}{4} \quad [\text{kJ}] \quad (18)$$

gdzie:

M – masa statku wraz z masą wody towarzyszącej [kNs²/m],

u – prędkość statku w momencie uderzenia (normalna do linii budowli hydrotechnicznej lub burty zacumowanego statku) [m/s].

Dopuszczalną energię kinetyczną uderzenia statku w budowlę hydrotechniczną lub zacumowany statek można określić, wykorzystując współczynnik odbicia statku od nabrzeża (Fender Factors). Współczynnikiem odbicia nazywany jest stosunek maksymalnej siły reakcji do energii kinetycznej uderzenia statku w nabrzeże lub urządzenie odbojowe. W przypadku niechronionego odbojnicami nabrzeża współczynnik ten można przyjąć jako równy $k = 150 \text{ kN/kNm}$ [16].

Znając dopuszczalne obciążenie kadłuba statku q [15] oraz przybliżoną powierzchnię kontaktu burty statku z nabrzeżem f , można określić dopuszczalną energię uderzenia statku w budowlę hydrotechniczną:

$$E_{dop}^u = \frac{q \cdot f}{k} \quad [\text{kJ}] \quad (19)$$

gdzie:

q – dopuszczalne obciążenie kadłuba, które zależy od wielkości i rodzaju statku [kN/m²],

f – przybliżona powierzchnia kontaktu burty statku z nabrzeżem [m²],

k – współczynnik odbicia statku od nabrzeża [kN/kNm].

Dopuszczalne obciążenia kadłuba zależą od typu statku i generalnie zawiera się w granicach od 200 kN/m² do 400 kN/m² [7, 16].

Skutki kolizji z innym statkiem określane są przy założeniu, że głównym czynnikiem wpływającym na wielkość skutków kolizji dwóch statków jest energia kinetyczna indukowana w punkcie pierwszego kontaktu. Energię kinetyczną indukowaną w punkcie pierwszego kontaktu statków na akwenie otwartym i torze wodnym wylicza się w następujący sposób:

1. Określenie kąta uderzenia β statku uderzającego (*striking* – *sr*) w stosunku do kąta drogi nad dnem statku uderzanego (*strucking* – *su*) lub wyliczenie kąta uderzenia statków idących wprost lub prawie na wprost.
2. Obliczenie energii uderzenia z zależności [15]:

$$E_K = 0,5 M_{sr} (V_{sr} \sin \beta)^2 - 0,5 \left(\frac{M_{sr}^2 (V_{sr} \sin \beta)^2}{M_{sr} + M_{su} (1 + C_{sr})} \right) \quad [\text{Nm}] \quad (20)$$

gdzie:

E_K – energia kinetyczna indukowana w miejscu kontaktu kadłubów statków podczas kolizji na dwukierunkowym torze wodnym [Nm],

M_{sr}, M_{su} – masy statków biorących udział w kolizji dwóch statków [kNs²/m],

C_{sr} – współczynnik masy wody towarzyszącej statku uderzającego,

β – kąt uderzenia statku uderzającego w stosunku do kąta drogi nad dnem statku uderzanego [°],

V_{sr} – prędkość statku uderzającego [m/s].

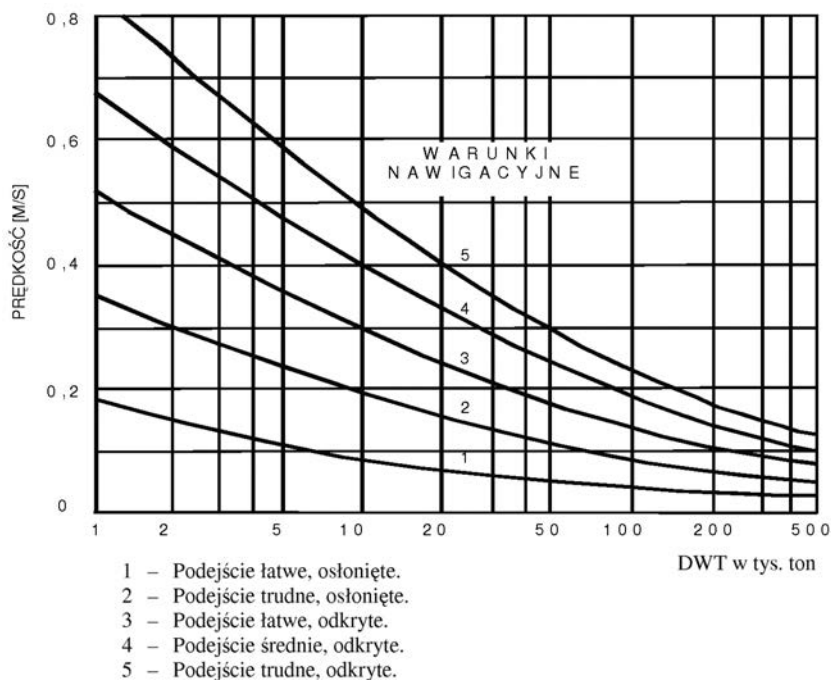
Skutki kolizji statków manewrujących na torze wodnym wylicza się na podstawie następującej procedury:

1. Określenie kąta uderzenia β statku podchodzącego do toru wodnego w stosunku do kąta drogi nad dnem statku manewrującego na torze dwukierunkowym lub wyliczenie kąta uderzenia statków idących wprost lub prawie na wprost.
2. Obliczenie energii uderzenia.
3. Obliczenie głębokości penetracji kadłuba statku uderzonego dziobem statku drugiego [15, 24]:

$$L_p = 2,67 \ln E_k - 1,97 \ln \left(\frac{M_{sr}}{1000} \right) + 1,66 \quad (21)$$

gdzie:

L_p – głębokość penetracji kadłuba statku dziobem statku uderzającego [m].



Rys. 1. Wykres projektowej prędkości podejścia statku do nabrzeża w funkcji jego nośności [15].

Powyższy wzór jest wynikiem analizy modeli numerycznych zależności funkcyjnych absorbowanej energii i wielkości przebiecia kadłuba statku [24].

4. Obliczenie skutków kolizji statków poruszających się po dwukierunkowym torze wodnym:

$$S_k = \frac{L_p}{L_{dop}} \quad (22)$$

gdzie:

S_k – skutki kolizji statków na dwukierunkowym torze wodnym,

L_{dop} – odległość pomiędzy poszyciami burty statku wynikającymi z odrębnych przepisów klasyfikacyjnych.

Przepisy PRS dla statków pasażerskich i towarowych (oprócz zbiornikowców) dotyczące parametrów wielkości przestrzeni pomiędzy poszyciami podwójnymi kadłuba określają, że przyjęta wartość L_{dop} nie może być mniejsza niż 760 mm i nie musi być większa niż 2000 mm.

Skutki przekroczenia dopuszczalnej energii uderzenia podczas manewrów cumowania określane są przy założeniu, że podczas manewrów cumowania pierwszy kontakt statku z nabrzeżem (odbojnicą) charakteryzuje się największą energią kinetyczną [5]. Wielkość energii kinetycznej absorbowanej przez system nabrzeże – odbojnica – statek rzutuje na wielkość sił reakcji systemu, które decydują o bezwypadkowym wykonaniu tego manewru. W związku z powyższym warunek bezpieczeństwa cumowania statku można zapisać następująco:

$$\left. \begin{aligned} E(t) &\leq E_{dop}^{nab} \\ E(t) &\leq E_{dop}^{stat} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

gdzie:

$E(t)$ – maksymalna energia kinetyczna cumowania statku (pierwszego kontaktu z odbojnicą) absorbowana przez system nabrzeże – odbojnica – statek [kJNm],

E_{dop}^{nab} – dopuszczalna energia kinetyczna, absorbowana przez system nabrzeże – odbojnica – statek [kJNm],

E_{dop}^{stat} – dopuszczalna energia kinetyczna, przy której powstałe siły reakcji systemu nabrzeże – odbojnica, nie powodują jeszcze trwałego odkształcenia kadłuba statku [kJNm].

Konsekwencją przekroczenia dopuszczalnych energii kinetycznych pierwszego uderzenia statku w nabrzeże może być uszkodzenie kadłuba lub/i odbojnicy i dlatego przy tego rodzaju scenariuszach awaryjnych liczone są oddzielnie skutki uszkodzenia kadłuba oraz skutki uszkodzenia odbojnicy:

- wyznacznik skutków uszkodzenia odbojnicy (nabrzeża):

$$S_o = \frac{E(t)}{E_{dop}^{nab}} \quad (24)$$

- wyznacznik skutków uszkodzenia kadłuba statku:

$$S_s = \frac{E(t)}{E_{dop}^{stat}} \quad (25)$$

W przypadku gdy $S_o > 1$, następuje uszkodzenie odbojnicy, a w przypadku gdy $S_s > 1$, następuje trwałe odkształcenie kadłuba statku.

Maksymalną energię kinetyczną cumowania statku można określić metodą symulacyjną lub empiryczną. W przypadku projektowania basenu portowego (podejście do nabrzeża i nabrzeża wraz z wyposażeniem) przy zastosowaniu metod symulacyjnych, maksymalna energia kinetyczna cumowania statku określana jest w wyniku przeprowadzonego eksperymentu jako największa z wszystkich serii. Stosując metody empiryczne, maksymalną energię kinetyczną cumowania statku określa się przy wykorzystaniu następującej przybliżonej zależności:

$$E(t) = \frac{M \cdot u_a}{4} \quad [\text{kJNm}] \quad (26)$$

gdzie:

u_a – składowa prędkości statku normalna do linii nabrzeża w momencie awaryjnego podejścia do nabrzeża [m/s].

Prędkość normalna awaryjnego dojścia statku do nabrzeża określana jest empirycznie jako 1,5 razy większa od prędkości projektowej urządzeń odbojowych i nabrzeży:

$$u_a = 1,5u_o \quad (27)$$

gdzie:

u_o – składowa prędkości statku normalna do linii nabrzeża w momencie podejścia przyjmowana jako projektowa dla urządzeń odbojowych i nabrzeży.

Projektowa prędkość normalna podejścia statku do nabrzeża określana jest przy pomocy wykresu funkcji pięciostopniowej skali warunków nawigacyjnych i DWT statku (rys. 1).

Dopuszczalną energię kinetyczną absorbowaną przez system nabrzeże – odbojnicę – statek E_{dop}^{nab} należy przyjąć jako równą dopuszczalnej energii kinetycznej odbojnicy, w które wyposażone jest nabrzeże.

Dopuszczalna energia kinetyczna, przy której powstałe siły reakcji systemu nabrzeże – odbojnicę nie powodują jeszcze trwałego odkształcenia kadłuba statku E_{dop}^{stat} , określana jest przy wykorzystaniu charakterystyki energetycznej odbojnic, w które wyposażone jest nabrzeże. Parametrem wejściowym do tej charakterystyki jest dopuszczalna siła reakcji kadłuba statku:

$$Q_{dop}^{stat} = f_o \cdot q \quad (28)$$

gdzie:

Q_{dop}^{stat} – dopuszczalna siła reakcji kadłuba statku przy kontakcie z odbojnicą [kN],

f_o – powierzchnia tarczy odbojowej odbojnicy zainstalowanej na nabrzeżu [m²],

q – dopuszczalne obciążenie kadłuba statku [kN/m²].

ZASTOSOWANIE OPRACOWANEJ METODY DO OCENY RYZYKA MANEWROWANIA STATKÓW NA AKWENACH OGRANICZONYCH

Opracowaną uniwersalną metodę można stosować do szacowania ryzyka każdego z wyżej opisanych charakterystycznych manewrów, rodzajów wypadków oraz ich przyczyn. Dla poszczególnych rodzajów wypadków na drogach wodnych i w portach opracowano procedury postępowania, które szczegółowo opisano w nowo wydanej książce pt. „Inżynieria ruchu morskiego. Wytyczne do projektowania morskich dróg wodnych i portów oraz warunków ich bezpiecznej eksploatacji” [7].

Przykładowo procedury postępowania przy ocenie ryzyka wejścia statku na mieliznę podczas przejścia torem wodnym przedstawiono poniżej.

Prawdopodobieństwo wejścia na mieliznę ze względu na pogorszenie warunków nawigacyjnych „statku maksymalnego” na i -tym odcinku toru wodnego na skutek pogorszenia warunków nawigacyjnych określa się następującą zależnością:

$$P_{ai} = \frac{P_{aij} \cdot P_h \cdot I_r \cdot \Delta t_i}{G_r} \quad (29)$$

gdzie:

P_{aij} – prawdopodobieństwo przekroczenia bezpiecznej izobaty przez bezpieczny obszar manewrowy badanego statku,

P_h – roczna częstość występowania wiatru w przedziale maksymalnym,

I_r – średnia roczna intensywność wykonania manewru przejścia badanego statku przez i -ty odcinek toru,

Δt_i – średni czas wykonania manewru przejścia i -tego odcinka toru przez badany statek [h],

G_r – liczba godzin w roku (8760 h).

Poszczególne czynniki tego wyrażenia określone są według następującego algorytmu:

1. Określenie metodą symulacyjną (lub CIRM) szerokości bezpiecznych obszarów manewrowych „statku maksymalnego” manewrującego w zadanych warunkach bezpiecznej eksploatacji dla i -tego odcinka drogi wodnej: $d_{i(1-\alpha)}$.
2. Określenie prawdopodobieństwa przekroczenia bezpiecznej izobaty przez bezpieczny obszar manewrowy badanego „statku maksymalnego”. Wykorzystywana jest standaryzacja rozkładu normalnego zmiennej losowej X_{ij} :

$$P_{aij} = P(X_{ij} > d_{ij}) \quad (30)$$

gdzie:

X_{ij} – zmienna losowa wyrażająca maksymalne zejście statku z osi toru w punkcie j ,

d_{ij} – najmniejsza odległość od osi toru do niebezpiecznej izobaty w punkcie j na i -tym odcinku drogi wodnej (toru).

W przypadku projektowania drogi wodnej na określonym poziomie ufności należy przyjąć:

$P_{aij} = 3 \cdot 10^{-3}$ – statki z ładunkiem niebezpiecznym $(1 - \alpha) = 0,997$,

$P_{aij} = 5 \cdot 10^{-2}$ – pozostałe statki $(1 - \alpha) = 0,95$.

3. Określenie rocznej częstości wystąpienia wiatru o prędkości w przedziale maksymalnym dla danego statku i jego manewru. W przypadku statków handlowych w portach polskich można przyjąć, że:

$$P_h = 0,1$$

4. Określenie średniej rocznej intensywności (częstości) wykonania manewru przejścia i -tego odcinka toru przez „statek maksymalny”: I_r .
5. Określenie średniego czasu przejścia i -tego odcinka toru wodnego przez „statek maksymalny”: Δt .

Skutki wejścia na mieliznę spowodowanego pogorszeniem warunków nawigacyjnych charakteryzuje następujący wyznacznik:

$$S_m = \frac{E(t)}{E_{dop}^m} \quad (31)$$

Do jego określenia przyjmowane są następujące dane:

V – prędkość z jaką statek wszedł na mieliznę przyjmowana jest na poziomie dopuszczalnej prędkości dla danego „statku maksymalnego” na badanym odcinku drogi wodnej,

θ' – kąt nachylenia skarpy w osi symetrii statku wchodzącego na mieliznę należy przyjąć jako równy 0,25 θ , czyli jedna czwarta kąta nachylenia skarpy (prostopadłej do osi toru),

U – siła uciągu odpowiada parametrom „statku maksymalnego”.

Skalę skutków wejścia statku na mieliznę, która jest jednym z dwóch argumentów (danych) wejściowych do macierzy ryzyka – RAM (tabl. 1), określa się zgodnie z tabl. 3.

Określone prawdopodobieństwo danego wypadku i skala jego skutków są argumentami, którymi wchodzi się do macierzy formalnej analizy ryzyka RAM (tabl. 1), w której określone jest ryzyko w stosunku do ryzyka dopuszczalnego.

Tabl. 3. Skala skutków wejścia statku na mieliznę

Wy- znacznik skutków	Warunki scenariusza awaryjnego	Skala skutków	Bezpie- czeństwo ludzi	Bezpie- czeństwo środowi- ska	Bezpie- czeństwo ekono- miczne
$S_m < 1$		5 (nieistotne)	5	5	5
$S_m \geq 1$	dno akwenu miękkie	5 (nieistotne)	5	5	5
$S_m \geq 1$	dno akwenu twarde	4 (nieznaczne)	5	5	4
$S_m \geq 1$	dno akwenu twarde; zbior- nikowiec bez podwójnego dna	3 (umiarko- wane)	5	3	4

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zaprezentowana w artykule metoda formalnej analizy ryzyka manewrowania statków na morskich drogach wodnych i w portach spełnia wymogi Formalnej Analizy Bezpieczeństwa (FSA) określone przez światowe instytucje zajmujące się standaryzacją prac projektowych w sektorze morskim [10, 11, 17]. Jest to sprawdzona w praktyce uniwersalna metoda, którą można zastosować przy projektowaniu dróg wodnych i portów, wykorzystując zarówno metodologię probabilistyczną (symulacyjną), jak i empiryczną.

Metodę tę można również stosować do określania warunków bezpiecznej eksploatacji statków w istniejących lub przebudowywanych systemach morskich dróg wodnych. Szczegółowy opis procedur tej metody przedstawiono w nowo wydanej książce pt.: „Inżynieria ruchu morskiego – wytyczne do projektowania morskich dróg wodnych i portów oraz warunków ich bezpiecznej eksploatacji” [7].

Biorąc pod uwagę pewną lukę w polskim systemie prawnym w zakresie systemowego podejścia do zarządzania ryzykiem nawigacyjnym, wydaje się celowe włączenie analizy ryzyka manewrowania statków na morskich drogach wodnych i w portach (spełniająca wymogi FSA) do „analizy nawigacyjnej”. Obecnie „analiza nawigacyjna” jest obligatoryjnym dokumentem przy projektowaniu morskich dróg wodnych i portów, która jest wykorzystywana zgodnie z rozporządzeniem ministra właściwego do spraw gospodarki morskiej.

LITERATURA

1. C van der Tak, J. H. de Jong: SAFETY ASSESSMENT IN PORTS, MSCN/MARIN, Wageningen, (MARIN Publication).
2. D'Angremond K.: Risk assessment in port planning and operation including port approaches. 29th PIANC Navigation Congress, 1998.
3. Dhillon B.S.: Transportation Systems Reliability and Safety. CRC Press Taylor & Francis Group, New York, 2011.
4. Formalna analiza ryzyka cumowania gazowców LNG typu Q-Flex przy stanowisku rozładunkowym w Porcie Zewnętrznym Świnoujście. Praca naukowa – badawcza. Akademia Morska w Szczecinie, 2015.

5. Gucma S.: Inżynieria ruchu morskiego. Wydawnictwo: Okrętownictwo i Żegluga, Gdańsk, 2001.
6. Gucma S. i inni: Morskie drogi wodne – projektowanie i eksploatacja w ujęciu inżynierii ruchu. Wydawnictwo: Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk, 2015.
7. Gucma S. i inni: Inżynieria Ruchu Morskiego – wytyczne do projektowania morskich dróg wodnych i portów oraz warunków ich bezpiecznej eksploatacji. Wydawnictwo: Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk, 2017, (w druku).
8. Gucma S., Łusznikow E.: Nawigacyjne ryzyko eksploatacji terminali paliwowych na przykładzie bazy paliw płynnych w Świnoujściu. VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Inżynierii Ruchu Morskiego, Szczecin, 1995.
9. Gucma S., Ślęczka W., Zalewski P.: Parametry torów wodnych i systemów nawigacyjnych wyznaczane przy wykorzystaniu bezpieczeństwa nawigacji. Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin, 2013.
10. IMO: Guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. Londyn, 2002.
11. IMO: IALA Risk Management Tool for Ports and Restricted Waterways, NAV 52/17/2. Londyn, 2006.
12. Kite-Powell H., Patrikalakis N.M.: Formulation of a Model for Ship Transit Risk: Technical Report. Massachusetts Institute of Technology Sea Grant College Program Report, No. 96-19, Massachusetts, 1996.
13. Kristiansen S.: Maritime Transportation. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005.
14. Łazuga K., Gucma L., Gucma M.: Analysis of hydro-meteorological conditions in the area of the Port of Świnoujście between 2001-2015. Scientific Journals of Maritime University of Szczecin 46 (118). Szczecin, 2016.
15. Pedersen P.T., Zhang S.: On impact mechanics in ship collisions. Danish Center for Applied Mathematics and Mechanics. Technical University of Denmark, 1998.
16. PIANC: Guidelines for the Design of Fenders System: 2002. Report of Working Group 33. PIANC General Secretariat, 2002.
17. PIANC: The World Association for Waterborne Transport Infrastructure, PIANC REPORT N° 121, Harbour Approach Channels Design Guidelines, Bruxelles, 2014.
18. Port & Harbour Risk Assessment and Safety Management Systems in New Zealand, MARITIME SAFETY AUTHORITY OF NEW ZEALAND, Wellington, 2004.
19. Rausand M.: Risk Assessment. Theory, Methods, and Applications. Wiley, New Jersey, 2011.
20. Ślęczka W.: Określenie skutków awarii statku powstałych podczas kolizji z dnem akwenu – aspekt fizyczny. Materiały na Krajową Konferencję Bezpieczeństwa i Niezawodności KONBiN'99, Zakopane-Kościelisko, 1999.
21. Warunki środowiskowe Południowego Bałtyku. Opracowanie IMiGW w Gdańsku, 2000.
22. Vinnem J. E.: Offshore Risk Assessment vol 1. Springer, London, 2014.
23. Wei He, Enjun Wang, Xinglong Liu, Chenguang Liu: A survey of Simulation Tools for Waterway Designing Assessment, The Open Automation and Control Systems Journal, 2014 (open access).
24. Zhang S.: The Mechanics of Ship Collisions. Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark, 1999.