**WARUNKI BEZPIECZNEJ EKSPLOATACJI STATKÓW
A PARAMETRY ELEMENTÓW SYSTEMU MORSKICH
DRÓG WODNYCH NA PRZYKŁADZIE PRZEBUDOWY
TORU WODNEGO ŚWINOUJŚCIE-SZCZECIN**

**CONDITIONS OF SAFE SHIP OPERATIONS AND SEA
WATERWAY PARAMETERS BASED ON THE
RECONSTRUCTION
OF ŚWINOUJŚCIE-SZCZECIN FAIRWAY**

Stanisław Gucma

Akademia Morska w Szczecinie
e-mail: s.gucma@am.szczecin.pl

Abstract: *This paper describes the state vector of safe ship operation on sea waterways. The author determines relationships between the state vector of safe ship operation and parameters of sea waterway system elements. These include three subsystems: area, navigation and traffic control. These relationships have been exemplified with the 68-kilometre Świnoujście-Szczecin fairway, presently under reconstruction. A systematic approach to sea waterway design is globally unique.*

Keywords: *sea traffic engineering, safe ship operation, sea waterway system.*

Streszczenie: *W artykule opisano wektor stanu bezpiecznej eksploatacji statków na morskich drogach wodnych. Określono zależności pomiędzy wektorem stanu bezpiecznej eksploatacji statków a parametrami elementów systemu morskich dróg wodnych. Elementami tego systemu są podsystemy: akwenu, nawigacyjny i regulacji ruchu. Zależności te przedstawiono na przykładzie obecnie przebudowywanego toru wodnego Świnoujście-Szczecin o długości 68 km. Systemowe podejście do projektowania morskich dróg wodnych jest nowatorskie w skali światowej.*

Słowa kluczowe: *inżynieria ruchu morskiego, bezpieczna eksploatacja statku, system morskich dróg wodnych.*

1. Wprowadzenie

Budowa i eksploatacja systemów morskich dróg wodnych generuje dwa podstawowe problemy badawcze:

- 1) Określenie warunków bezpiecznej eksploatacji statków na istniejącej morskiej drodze wodnej.
- 2) Określenie parametrów systemu morskich dróg wodnych dla założonych bezpiecznych warunków eksploatacji statków.

Warunki bezpiecznej eksploatacji statków na drodze wodnej opisuje wektor warunków bezpiecznej eksploatacji „statku maksymalnego” na i -tym odcinku badanej drogi wodnej, który zapisujemy w postaci [3], [7]:

$$\mathbf{W}_i = [t_{yp}, L_c, B, T, H_{st}, V, C, \mathbf{H}_i] \quad (1)$$

gdzie:

- t_{yp} – typ „statku maksymalnego”;
- L_c – długość całkowita „statku maksymalnego”;
- B – szerokość „statku maksymalnego”;
- T – zanurzenie „statku maksymalnego”;
- H_{st} – wysokość od poziomu wody do topu „statku maksymalnego”;
- V_i – dopuszczalna prędkość „statku maksymalnego” na i -tym odcinku drogi wodnej;
- C_i – asysta holownicza na i -tym odcinku drogi wodnej (wymagana ilość i uciagi holowników);
- $\mathbf{H}_i$ – wektor warunków hydrometeorologicznych dopuszczalnych dla „statku maksymalnego” na i -tym odcinku drogi wodnej.

$$\mathbf{H}_i = [d/n, \Delta h_i, V_{wi}, KR_{wi}, V_{pi}, h_{fi}, KR_{fi}] \quad (2)$$

gdzie:

- d/n – dopuszczalna pora doby (dzień lub bez ograniczeń);
- Δh_i – dopuszczalne obniżenie poziomu zwierciadła wody;
- V_{wi} – dopuszczalna prędkość wiatru na i -tym odcinku;
- KR_{wi} – ograniczenia kierunku wiatru (jeśli występują na i -tym odcinku);
- V_{pi} – dopuszczalna prędkość prądu na i -tym odcinku;
- h_{fi} – dopuszczalna wysokość fali na i -tym odcinku;
- KR_{fi} – ograniczenia kierunku nabiegu fali (jeśli występują).

Badania systemów morskich dróg wodnych takiego rodzaju jak: tory wodne (otwarte, podejściowe, kanały portowe, itp.), wejścia do portów, obrotnice i kotwiczowiska umożliwiły określenie zależności elementów systemu od warunków bezpiecznej eksploatacji statków w systemie. Takiego rodzaju system morskich dróg wodnych w zapisie macierzowym można przedstawić następująco [5]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_i \\ \mathbf{N}_i \\ \mathbf{Z}_i \end{bmatrix} = f(\mathbf{W}_i) \quad (3)$$

gdzie:

- $\mathbf{A}_i$ – podsystem i -tego odcinka drogi wodnej;
- $\mathbf{N}_i$ – podsystem nawigacyjny i -tego odcinka drogi wodnej;
- $\mathbf{Z}_i$ – podsystem regulacji ruchu i -tego odcinka drogi wodnej;
- $\mathbf{W}_i$ – warunki bezpiecznej eksploatacji statku na i -tym odcinku drogi wodnej.

Powyższą zależność można uzasadnić tym, że wektor warunków bezpiecznej eksploatacji „statku maksymalnego” na i -tym odcinku drogi wodnej jednoznacznie określa rezerwę wody pod stępką oraz szerokość bezpiecznego obszaru manewrowego „statku maksymalnego”. Czyli:

$$\begin{aligned}\Delta_i &= f_1(\mathbf{W}_i) \\ d_i &= f_2(\mathbf{W}_i)\end{aligned}\tag{4}$$

gdzie:

- Δ_i – dopuszczalna rezerwa wody pod stępką „statku maksymalnego” na i -tym odcinku drogi wodnej;
- d_i – szerokość bezpiecznego obszaru manewrowego „statku maksymalnego” na i -tym odcinku drogi wodnej.

Uwzględniając z kolei podstawowy warunek bezpieczeństwa nawigacji [6] można określić zależność funkcyjną pomiędzy elementami systemu morskich dróg wodnych a rezerwą wody pod stępką i bezpiecznym obszarem manewrowym „statku maksymalnego”. Czyli:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_i \\ \mathbf{N}_i \\ \mathbf{Z}_i \end{bmatrix} = f_n(\Delta_i, d_i)\tag{5}$$

2. Metody określania parametrów elementów systemu morskich dróg wodnych w funkcji zadanych warunków bezpiecznej eksploatacji statków

Wzajemne zależności pomiędzy parametrami systemu morskich dróg wodnych i warunkami bezpiecznej eksploatacji statków na tej drodze umożliwiają określenie parametrów podstawowych elementów budowanego lub przebudowanego systemu morskich dróg wodnych (podsystemów: drogi wodnej, nawigacyjnego, regulacji ruchu).

Parametry systemu morskich dróg wodnych są funkcją projektowanych (założonych) warunków bezpiecznej eksploatacji statku:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_i \\ \mathbf{N}_i \\ \mathbf{Z}_i \end{bmatrix} = f(\mathbf{W}_i) \quad (6)$$

Uwzględniając filozofię projektowania morskich dróg wodnych [10], podstawy projektowania śródlądowych dróg wodnych [9] oraz zasady projektowania morskich dróg wodnych z punktu widzenia inżynierii ruchu morskiego [2], [8] proces projektowania systemów morskich dróg wodnych dzieli się na dwa etapy [7]:

- projektowanie wstępne (Concept Design);
- projektowanie szczegółowe (Detailed Design).

Na wstępnym etapie „statki maksymalne” dla projektowanej drogi wodnej wybierane są ze zbioru „statków maksymalnych” charakterystycznych typów (j) przewidzianych do eksploatacji na tej drodze wodnej. Są to trzy „statki maksymalne” o odpowiednio największej maksymalnej długości, szerokości i zanurzeniu, a ich wektory bezpiecznej eksploatacji odpowiednio wynoszą $\mathbf{W}_i [\max(L_{cj})]$; $\mathbf{W}_i [\max(B_j)]$; $\mathbf{W}_i [\max(T_j)]$. Rezerwa wody pod stępką i szerokość bezpiecznego obszaru manewrowego dla poszczególnych trzech „statków maksymalnych” na odpowiednich odcinkach drogi wodnej określone są przy wykorzystaniu przybliżonych metod wstępnego projektowania.

Rezerwę wody pod stępką „statków maksymalnych” $\Delta_i^w [\max(L_{cj})]$; $\Delta_i^w [\max(B_j)]$; $\Delta_i^w [\max(T_j)]$ określa się jedną z następujących metod empirycznych:

- metoda współczynnikowa;
- metoda elementów składowych.

Metoda elementów składowych rekomendowana jest przy określaniu rezerwy wody pod stępką statków eksploatowanych niezależnie od stanów wody takich jak: promy morskie, gazowce LNG.

Szerokość bezpiecznego obszaru manewrowego „statków maksymalnych” $d_i^w [\max(L_{cj})]$; $d_i^w [\max(B_j)]$; $d_i^w [\max(T_j)]$ określa się jedną z następujących metod empirycznych:

- metoda Instytutu Nawigacji Morskiej (metoda deterministyczno-probabilistyczna);
- metoda PIANC;
- metoda Kanadyjska;
- metoda USA CA.

Można też stosować tu kilka metod i uśredniać ich wyniki.

Na wstępnym etapie projektowania obliczenia szerokości bezpiecznego obszaru manewrowego przeprowadza się na poziomie ufności $(1-\alpha) = 0,95$.

Na etapie szczegółowego projektowania morskich dróg wodnych dla każdego z jej odcinków określone są:

- 1) „Statki charakterystyczne”, wektory ich warunków bezpiecznej eksploatacji $\mathbf{W}_i [\max(T_j + \Delta_j)]$; $\mathbf{W}_i [\max(d_j)]$ oraz dopuszczalny poziom ufności lub akceptowalne ryzyko nawigacyjne, na których przeprowadzane są obliczenia $(1-\alpha_i)$ lub R_{akci} .
- 2) Rezerwa wody pod stępką i szerokość bezpiecznego obszaru manewrowego „statków charakterystycznych” na dopuszczalnym poziomie ufności (lub akceptowalnym poziomie ryzyka nawigacyjnego) $T_{ij} + \Delta_{ij}(1-\alpha_i) = \max$; $d_{ij}(1-\alpha_i) = \max$.
- 3) Optymalne parametry podsystemu projektowanej morskiej drogi wodnej $\mathbf{A}_i; \mathbf{N}_{im}; \mathbf{Z}_{im}$.
- 4) Szczegółowe warunków bezpiecznej eksploatacji drogi wodnej.

„Statkami charakterystycznymi” nazywane są dwa statki obliczeniowe wybrane ze zbioru j „statków maksymalnych” badanych na wstępnym etapie. Statki te posiadają następujące cechy:

- maksymalną bezpieczną głębokość akwenu $\max(T_j + \Delta_j)$;
- maksymalną szerokość bezpiecznego obszaru manewrowego $\max(d_j)$.

Budowane są wektory warunków bezpiecznej eksploatacji „statków charakterystycznych”:

$$\mathbf{W}_i [\max(T_j + \Delta_j)] \quad (7)$$

$$\mathbf{W}_i [\max(d_j)] \quad (8)$$

Dla tych statków określany jest dopuszczalny poziom ufności $1-\alpha_i$ lub akceptowalne ryzyko nawigacyjne R_{akci} , na których będą przeprowadzane obliczenia rezerwy wody pod stępką oraz szerokości bezpiecznych obszarów manewrowych.

Na szczegółowym etapie projektowanie obliczenia przeprowadza się dla systemów nawigacyjnych przewidzianych do pracy w odpowiednich warunkach widzialności na następującym poziomie ufności [7]:

- statki z ładunkiem niebezpiecznym:
 - dwa systemy podstawowe $(1-\alpha) = 0,997$;
 - system dodatkowy $(1-\alpha) = 0,95$;
- statki pozostałe:
 - system podstawowy $(1-\alpha) = 0,95$;
 - system dodatkowy $(1-\alpha) = 0,95$.

Ryzyko akceptowalne określone jest w zależności od skutków danego wypadku [1]:

- przy wejściu na mieliznę:
 - $R_{akc} = 4 \cdot 10^{-3}$ (akweny pływowe);
 - $R_{akc} = 7 \cdot 10^{-3}$ (akweny bezpływowe);
- przy kolizji statków bez pasażerów:
 - $R_{akc} \approx 10^{-3}$;
- przy kolizji statków z pasażerami:
 - $R_{akc} \approx 5 \cdot 10^{-4}$;
- przy kolizji statków z ładunkiem niebezpiecznym:
 - $R_{akc} \approx 10^{-4}$;
- przy kolizji statków z pasażerami i ładunkiem niebezpiecznym:
 - $R_{akc} \approx 10^{-5}$.

Rezerwa wody pod stępką i szerokości bezpiecznych obszarów manewrowych „charakterystycznych statków” na określonym poziomie ufności (lub akceptowalnym ryzyku nawigacyjnym) określone są przy wykorzystaniu szczegółowych metod projektowania.

Rezerwę wody pod stępką „statków charakterystycznych” określa się jedną z następujących metod empirycznych:

- metoda elementów składowych;
- metoda trzech czynników;
- metoda probabilistyczna.

Szerokość bezpiecznego obszaru manewrowego „statku charakterystycznego” określa się metodą empiryczną: *metodą deterministyczno-probabilistyczną CIRM* lub metodami symulacyjnymi:

- metodą symulacji ruchu statków w czasie rzeczywistym (modele nieautonomiczne);
- metodą symulacji ruchu statków w czasie przyspieszonym (modele autonomiczne).

Metoda symulacji ruchu statków w czasie przyspieszonym może być stosowana jedynie do projektowania prostoliniowych odcinków dróg wodnych i zakoli.

3. Określenie parametrów przebudowywanego toru wodnego Świnoujście-Szczecin dla założonych warunków bezpiecznej eksploatacji statków

Przebudowa toru wodnego Świnoujście-Szczecin dotyczyła jego pogłębienia do 12,5 m (obecna głębokość to 10,5 m) i jednocześnie przebudowy umożliwiającej przejście „maksymalnych statków” charakterystycznych typów przewidzianych do eksploatacji. Celem przeprowadzonych badań było:

- Określenie bezpiecznych parametrów toru wodnego Świnoujście-Szczecin na odcinku od km 5,280 do km 67,700 ze szczególnym uwzględnieniem zakoli i ich odcinków przejściowych, obrotnic oraz mijanek.
- Określenie parametrów zmodernizowanego systemu oznakowania nawigacyjnego toru wodnego Świnoujście-Szczecin.
- Określenie warunków bezpiecznej eksploatacji statków na zmodernizowanym torze wodnym Świnoujście-Szczecin oraz założeń systemu regulacji ruchu.

Zgodnie z systemowym podejściem do projektowania dróg wodnych badany tor podzielono na odcinki, przy ich wyodrębnianiu wykorzystano następujące kryteria porównawcze [4]:

- wykonywany manewr,
- parametry techniczne drogi wodnej,
- parametry techniczne stosowanych systemów nawigacyjnych,
- panujące warunki hydrometeorologiczne,
- przepisy portowe i systemy regulacji ruchu.

Badania prowadzone dla trzech typów „statków maksymalnych”:

- wycieczkowiec: $L_c = 260$ m; $T = 9,0$ m;
- kontenerowiec: $L_c = 250$ m; $T = 11,0$ m;
- masowiec: $L_c = 220$ m; $T = 11,0$ m.

Przy określeniu rezerwy wody pod stępką „statkiem charakterystycznym” był kontenerowiec, natomiast przy określeniu bezpiecznego obszaru manewrowego był nim wycieczkowiec.

Rezerwę wody pod stępką określono metodą elementów składowych [2]. Szerokości bezpiecznych obszarów manewrowych na odcinkach prostoliniowych toru wodnego określono metodą deterministyczno-probabilistyczną CIRM (Centrum Inżynierii Ruchu Morskiego) opracowaną w Akademii Morskiej

w Szczecinie [8]. Natomiast do określenia bezpiecznych obszarów manewrowych na zakolach toru posłużono się metodą symulacji ruchu statków w czasie rzeczywistym.

Procedura badań symulacyjnych w inżynierii ruchu morskiego sprowadzona jest do następujących etapów:

- sformułowanie problemu badawczego, w tym określenie celu projektowania, zastosowanych metod symulacji i rodzaju symulatorów;
- budowa lub wybór modeli ruchu statków na wybranym symulatorze oraz ich weryfikacja;
- projektowanie układu eksperymentalnego i przeprowadzenie eksperymentu;
- opracowanie i analiza statystyczna wyników badań.

Badania symulacyjne przeprowadzono na wielomostkowym symulatorze nawigacyjno - manewrowym Polaris firmy Konsberg Maritime AS z wizualizacją typu projekcyjnego 3D. Jest to symulator typu FMBS (Full Mission Bridge Simulation) połączony z systemem dynamicznego pozycjonowania znajdujący się w Centrum Inżynierii Ruchu Morskiego Akademii Morskiej w Szczecinie. Jest to jedyne w Polsce tego typu laboratorium umożliwiające budowę własnych modeli hydrodynamicznych jednostek pływających oraz baz danych akwenu. W laboratorium tym prowadzone są w szerokim zakresie prace naukowo-badawcze z inżynierii ruchu morskiego.

Projektowanie układu eksperymentalnego badań symulacyjnych na FMBS sprowadza się do następujących zadań:

- 1) Opracowanie zakresu badań symulacyjnych. Określenie ilości charakterystycznych serii badań oraz warunków nawigacyjnych i przyjętej taktyki manewrowania w każdej serii badań. Warunki te powinny być tak dobrane aby maksymalizować szerokości bezpiecznych obszarów manewrowych badanych „statków charakterystycznych”.
- 2) Określenie liczebności manewrów (prób) symulacyjnych w poszczególnych seriach badań.
- 3) Dobór wykonawcy badań symulacyjnych. Określenie kwalifikacji osób wykonywujących manewry symulacyjne i maksymalnych liczebności wykonywanych przez 1 osobę w danej serii badań.

Zakres badań symulacyjnych obejmował następujące manewry:

Przejście torem wodnym z prędkością $V = 8$ węzłów wycieczkowca i masowca na wybranych zakrętach:

Zakręt Mańków 41,0 km ÷ 43,0 km / ± 250 m: <ul style="list-style-type: none"> Przejście do Szczecina Prąd = 0 Wiatr = 10 m/s NW i SW 	2 serie badań dla każdego "statku charakterystycznego" przy dwóch różnych kierunkach wiatru NW i SW.
Zakręt Ińskie-Babina 51,5 km ÷ 55,5 km / ± 250 m: <ul style="list-style-type: none"> Przejście do Świnoujścia Prąd = wychodzący 0,7 węzła Wiatr = 10 m/s S i W 	2 serie badań dla każdego "statku charakterystycznego" przy dwóch różnych kierunkach wiatru S i W.
Zakręt Święta 58,5 km ÷ 61,0 km / ± 250 m: <ul style="list-style-type: none"> Przejście do Świnoujścia Prąd = wychodzący 0,7 węzła Wiatr = 10 m/s S i W 	2 serie badań dla każdego "statku charakterystycznego" przy dwóch różnych kierunkach wiatru S i W.

Obracanie wycieczkowca:

Obrotnica Orli Przesmyk 63,1 km ÷ 64,0 km / ± 250 m: <ul style="list-style-type: none"> wprowadzany rufą do Szczecina $V = 4$ węzły obrót w lewo Prąd = wychodzący 0,7 węzła Wiatr = 10 m/s S i W 	Północny wariant dostępnego akwenu żeglugowego – 2 serie badań przy kierunkach wiatru S i W (2 holowniki o uciagu 2 x 45 ton). Południowy wariant dostępnego akwenu żeglugowego – 2 serie badań przy kierunkach wiatru S i W (2 holowniki o uciagu 2 x 45 ton).
---	--

Obracanie kontenerowca:

Obrotnica Orli Przesmyk 63,1 km ÷ 64,0 km / ± 250 m: <ul style="list-style-type: none"> wprowadzany rufą do Szczecina $V = 4$ węzły obrót w lewo Prąd = wychodzący 0,7 węzła Wiatr = 10 m/s S i W 	Wariant z przesunięciem linii brzegowej Ostrów Grabowski o 150 m – 2 serie badań przy kierunku wiatru S i W (2 holowniki o uciagu 2 x 45 ton). Wariant z przesunięciem linii brzegowej Ostrów Grabowski o 120 m – 1 seria badań przy kierunku wiatru W (2 holowniki o uciagu 2 x 45 ton).
---	--

Minimalną liczebność manewrów symulacyjnych w serii badań przyjęto jako równą $n = 12$ dla jednego kierunku wiatru [2].

Manewry symulacyjne wykonywali piloci Stacji Pilotowej w Szczecinie i kapitanowie posiadający doświadczenie w manewrowaniu dużymi statkami. Każda z osób wykonywała 2 manewry symulacyjne w danej serii badań.

Analiza wyników badań symulacyjnych na zakolach toru wodnego przy wykorzystaniu statystycznych testów zgodności wykazała, że brak jest statystycznych istotnych różnic (poziom istotności $\alpha = 0,05$) pomiędzy szerokościami pasów ruchu wycieczkowca i masowca przy wiatrach:

- NW i SW na Zakręcie Mańków;
- S i W na Zakrętach: Ińskie, Babina i Święta.

W związku z powyższym do dalszych analiz przyjęto, że bezpieczne obszary manewrowe dla poszczególnych statków dotyczą wszystkich kierunków wiatru o prędkościach 10 m/s.

Wyniki badań symulacyjnych na Obrotnicy Przesmyk Orli umożliwiły wybór najkorzystniejszego wariantu dla kontenerowca $L_c = 250$ m; $T = 11,0$ m. Wariant ten uwzględnia również bezpieczny obszar manewrowy maksymalnego wycieczkowca.

Do określania parametrów systemu morskich dróg wodnych (toru wodnego Świnoujście-Szczecin) posłużono się symulacyjną metodą optymalizacji. Wykorzystując tą metodę określono parametry podstawowych elementów podsystemu drogi wodnej i podsystemu nawigacyjnego. Parametry elementów systemu morskich dróg wodnych są funkcją projektowanych (założonych) warunków bezpiecznej eksploatacji statku (wektora stanu warunków bezpiecznej eksploatacji statku).

Funkcją celu w zadaniach optymalizacji parametrów systemu morskich dróg wodnych jest koszt budowy (modernizacji) elementów systemu drogi wodnej oraz koszt eksploatacji tych elementów. Przyjmując powyższe założenia, funkcję celu optymalizacji parametrów dróg wodnych można zapisać w postaci [4]:

$$Z = F(\mathbf{D}_i, h_{xy}) \rightarrow \min \quad (9)$$

przy ograniczeniu, którym jest warunek bezpieczeństwa nawigacji:

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{d}_i (1 - \alpha) \subset \mathbf{D}_i \\ \bigwedge_{p(x, y) \in \mathbf{D}_i} h_{xy}(t) \geq T_{xy}(t) + \Delta_{xy}(t) \end{array} \right\} \quad (10)$$

gdzie:

- $\mathbf{D}_i$ – dostępny akwen żeglugowy spełniający warunek bezpiecznej głębokości na i -tym odcinku drogi wodnej;

-
- $\mathbf{d}_i(1 - \alpha)$ – bezpieczny obszar manewrowy na i -tym odcinku drogi wodnej „maksymalnego statku” wykonywującego manewr w zadanych warunkach nawigacyjnych określony na poziomie ufności $1 - \alpha$;
 Z – koszt budowy i eksploatacji systemu dróg wodnych;
 h_{xy} – głębokość akwenu w punkcie x,y ;
 T_{xy} – zanurzenie statku w punkcie x,y ;
 Δ_{xy} – rezerwa wody pod stępką w punkcie x,y .

W przypadku morskich dróg wodnych o stałej głębokości ($h_{xy} = const$) funkcję celu można zapisać w postaci:

$$Z = F(\mathbf{D}_i) \quad (11)$$

przy ograniczeniu:

$$\mathbf{d}_i(1 - \alpha) \subset \mathbf{D}_i(t) \quad (12)$$

Natomiast na torach wodnych parametrem determinującym bezpieczeństwo jest szerokość toru w dnie. Dlatego funkcja celu można zapisać w następującej postaci:

$$Z = F(D_j) \rightarrow \min \quad (13)$$

przy ograniczeniu:

$$D_j \geq d_j(1 - \alpha) \quad (14)$$

gdzie:

- D_j – dostępna szerokość toru wodnego w dnie w j -tym punkcie osi toru;
 $d_j(1 - \alpha)$ – bezpieczna szerokość toru wodnego w dnie „maksymalnego statku” wykonywującego manewr w zadanych warunkach nawigacyjnych w j -tym punkcie osi toru określona na poziomie ufności $1 - \alpha$.

Wykorzystując metodę CIRM dla prostopadłych odcinków toru wodnego Świnoujście-Szczecin i Obrotnicy Parnica oraz symulacyjną metodę optymalizacji dla zakoli toru wodnego i Obrotnicy Przesmyk Orli określono parametry (szerokości dostępnego akwenu żeglugowego) toru wodnego Świnoujście-Szczecin (Tabela 1). Przykładowe wyniki badań symulacyjnych dla zakrętu Mańków przedstawiono na rysunku 1, gdzie projektowaną izobatę określono metodami empirycznymi; pasy ruchu: maksymalny średni i na poziomie ufności 0,95 to wyniki obróbki statystycznej 24 przejazdów symulacyjnych (eksperyment symulacyjny).

Tabela 1 Bezpieczne szerokości modernizowanego toru wodnego w dnie (12,5 m)

Lp.	Nazwa odcinka		Kilometraż	Bezpieczna szerokość w dnie $d_j(0,95)$
3.	Odcinek prosty	Zalew Szczeciński	16,5 km ÷ 41,0 km	100 m
3a.	Odcinek prosty	Mijanka Zalew Szczeciński	23,8 km ÷ 28,8 km	250 m
4.	Zakręt	Mańków	41,0 km ÷ 43,0 km	150-180 m
5.	Odcinek prosty	Krępa – Kanał Policki	43,0 km ÷ 49,0 km	100 m
6.	Zakręt	Police	49,0 km ÷ 49,5 km	150 m
7.	Obrotnica	Police	49,5 km ÷ 50,4 km	350 m
8.	Odcinek prosty	Mijanka Police	50,4 km ÷ 51,5 km	220 m
9.	Zakręty	Ińskie – Babina	51,5 km ÷ 55,5 km	150-180 m
10.	Odcinek prosty	Dębina	55,5 km ÷ 58,5 km	100 m
11.	Zakręt	Święta	58,5 km ÷ 61,0 km	130-140 m
12.	Odcinek prosty	Święta – Okrętowa	61,0 km ÷ 63,0 km	100 m
13.	Obrotnica	Przesmyk Orli	63,0 km ÷ 64,0 km	nieforemna
14.	Odcinek prosty	Przekop Mieleński	64,0 km ÷ 67,0 km	100 m
15.	Obrotnica	Parnica	67,0 km ÷ 67,4 km	350 m *

* – średnica obrotnicy

Rys. 1 Wyniki badań symulacyjnych wycieczkowca $L_c = 260$ m na Zakręcie Mańków. Prędkość wiatru 10 m/s

4. Wnioski

W artykule określono zależności pomiędzy parametrami elementów systemu dróg wodnych, a wektorem stanu bezpiecznych warunków eksploatacji statków. Przedstawiono nowe metody określania parametrów systemu morskich dróg wodnych w funkcji zadanych warunków bezpiecznej eksploatacji statków. Są to metody określania bezpiecznych obszarów manewrowych „maksymalnych statków”:

- deterministyczno-probabilistyczna metoda CIRM;
- symulacyjna metoda optymalizacji.

Obie metody zostały opracowane w Akademii Morskiej w Szczecinie i z powodzeniem zastosowane do wymiarowania przebudowywanego toru wodnego Świnoujście-Szczecin. Jest to trudna nawigacyjnie morska droga wodna o długości około 68 km, posiadająca różne odcinki takie jak: rzeka (Odra), Zalew Szczeciński czy sztuczny kanał (Kanał Piastowski, Przekop Mieleński). Pogłębienie tej drogi wodnej do 12,5 m narzuca konieczność jej jednoczesnego poszerzenia, które umożliwi żeglugę statków odpowiedniej wielkości o zanurzenia rzędu 11,0 m.

Deterministyczno-probabilistyczną metodę CIRM wykorzystano do określania szerokości bezpiecznych obszarów manewrowych „statków maksymalnych” na prostoliniowych odcinkach toru. Symulacyjną metodę optymalizacji bezpiecznych obszarów manewrowych „statków maksymalnych” wykorzystano do wymiarowania zakrętów toru.

5. Literatura

- [1] Gucma L. (2009): *Wytyczne do zarządzania ryzykiem morskim*. Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin 2009, stron 125, ISBN 978-83-89901-42-2.
- [2] Gucma S. (2001): *Inżynieria ruchu morskiego*. Wydawnictwo: Okrętownictwo i Żegluga, Gdańsk 2001, stron 179. ISBN 83-908796-6-2.
- [3] Gucma S. (2013a): *Conditions of safe ship operation in sea waterway systems*. Scientific Journals Maritime University of Szczecin, No 36(108)2013, z. 1, pp. 55-58, Szczecin 2013, ISSN 1733-8670.
- [4] Gucma S. (2013b): *Optimization of sea waterway system parameters in marine traffic engineering*. Journal of Konbin, No 2(26) 2013, pp. 51-60, Wydawnictwo ITWL, Warszawa, ISSN 1895-8281.
- [5] Gucma S. (2014): *Systems approach to sea waterways*. Scientific Journals Maritime University of Szczecin. No 38(110)2014, pp. 39-44, ISSN 1733-8670.
- [6] Gucma S., Gucma L., Zalewski P. (2008): *Symulacyjne metody badań w inżynierii ruchu morskiego*. Monografia pod redakcją Stanisława Gucmy. Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin 2008, stron 224. ISBN 978-83-89901-29-3.

- [7] Gucma S. i inni (2015): *Morskie drogi wodne – projektowanie i eksploatacja w ujęciu inżynierii ruchu morskiego*. Monografia pod redakcją Stanisława Gucmy. Wydawnictwo: Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk, w druku.
- [8] Gucma S., Ślaczka W., Zalewski P. (2013): *Parametry torów wodnych i systemów nawigacyjnych wyznaczane przy wykorzystaniu kryteriów bezpieczeństwa nawigacji*. Monografia pod redakcją Stanisława Gucmy. Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin 2013, stron 96, ISBN 978-83-89901-82-8.
- [9] Kulczyk J., Winter J. (2003): *Śródlądowy transport wodny*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- [10] PIANC (2014): *Harbour Approach Channels Design Guidelines*. PIANC Report, PIANC Secretariat General. Bruksela.

Prof. dr hab. inż. kpt. ż. w. Stanisław Gucma, profesor Akademii Morskiej w Szczecinie. Stworzył pierwszą w Polsce szkołę naukową inżynierii ruchu morskiego. Opublikował w tej dziedzinie 16 książek i ponad 190 publikacji naukowych. Kierował pracami w ponad 150 projektach badawczych, z których większość została wdrożona w Polsce i krajach UE, dotyczyły one między innymi największych polskich inwestycji morskich. Członek Komitetu Transportu PAN, Akademii Inżynierskiej w Polsce, Komitetu Transportu Rosji.